

---

# **BACHELORARBEIT**

---

Herr  
**Kai Winkler**

**Entwicklung und Aufbau einer  
elektrischen Schaltung für die  
gepulste magnetomotive  
Optische Kohärenztomografie**

2013



# **BACHELORARBEIT**

---

## **Entwicklung und Aufbau einer elektrischen Schaltung für die gepulste magnetomotive Optische Kohärenztomografie**

Autor:

**Kai Winkler**

Studiengang:

Physikalische Technik - Medizintechnik

Seminargruppe:

PT10wM-B

Erstprüfer:

Prof. Dr. Ralf Hinderer

Zweitprüfer:

Prof. Dr. rer. nat. Edmund Koch

Mittweida, September 2013

---

## **Danksagung**

Zuerst möchte ich mich bei Dipl.Ing. Peter Cimalla bedanken, meinem Betreuer, der mir die Arbeit an diesem Thema ermöglicht hat und mir immer mit neuen Ideen, Problemlösungen und Verbesserungsvorschlägen zur Seite stand. Das gleiche gilt für Dipl. Ing. Mirko Mehner, der uns bezüglich des konstruktiven Anteils der Arbeit beraten und seine Hilfe jederzeit angeboten hat. Ich möchte mich auch bei allen anderen Kolleginnen und Kollegen der Forschungsgruppe Klinisches Sensoring und Monitoring und ihrem Leiter Prof. Dr. Edmund Koch bedanken, die eine wunderbare Arbeitsatmosphäre geschaffen haben und von deren Seite man auch immer Ratschläge und Hilfe erwarten konnte.



# I. Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Vorbetrachtungen und Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Magnetismus . . . . .	3
2.1.1 Diamagnetismus . . . . .	4
2.1.2 Paramagnetismus . . . . .	5
2.1.3 Ferromagnetismus . . . . .	5
2.2 Elektromagnetismus . . . . .	6
2.3 Elektrizität . . . . .	7
2.3.1 Spule . . . . .	8
2.3.2 Komplexer Widerstand . . . . .	9
2.3.3 Kondensator . . . . .	12
2.4 Magnetfelderzeugung durch Spulen . . . . .	13
2.5 Optische Kohärenztomografie . . . . .	14
2.5.1 Grundlagen . . . . .	14
2.5.2 Doppler-OCT . . . . .	15
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>17</b>
<b>4 Material und Methoden</b>	<b>19</b>
4.1 Aufbau der Impulsschaltung . . . . .	20
4.2 Kompletter Aufbau zum Betrieb der Schaltung . . . . .	22
4.3 Bestimmung der Induktivität und der magnetischen Flussdichte der Spule . . . . .	22
<b>5 Ergebnisse</b>	<b>25</b>
5.1 Simulation . . . . .	25
5.2 Aufgebaute Impulsschaltung . . . . .	27
5.3 Doppler-OCT-Aufnahmen eines Phantoms . . . . .	30
<b>6 Diskussion</b>	<b>31</b>
<b>7 Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>33</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>35</b>
<b>8 Anhang</b>	<b>37</b>



## II. Abbildungsverzeichnis

2.1 Komplexer Widerstands im Zeigerdiagramm . . . . .	11
3.1 Schematischer Aufbau des OCT-Systems und Foto des OCT-Messkopfes mit Magnet .	17
4.1 Selbstgebafter Magnet mit Bohrung für die Optik des OCT-Messkopfes . . . . .	20
4.2 Schematischer Aufbau der Impulsschaltung . . . . .	21
4.3 Aufbau zur Bedienung der Schaltung . . . . .	23
5.1 Simulation der Spannung über dem Kondensator . . . . .	25
5.2 Simulation des Stromes durch den Messwiderstand (21 $mH$ ) . . . . .	26
5.3 Simulation des Stromes durch den Messwiderstand (10 $mH$ ) . . . . .	26
5.4 Aufbau der Impulsschaltung . . . . .	27
5.5 Messung des Stromes durch den Messwiderstand . . . . .	28
5.6 Darstellung der Induktivität in Abhängigkeit der Frequenz eines Wechselstromes mit der Spannungsamplitude von 6 V . . . . .	28
5.7 Die magnetische Flussdichte bei den Ladespannungen 60 V und 120 V. . . . .	29
5.8 B-Scan mit Dopplerphasenverschiebung einer Schicht magnetischer Nanopartikel . .	30



---

## **Bibliografische Angaben**

Winkler, Kai: Entwicklung und Aufbau einer elektrischen Schaltung für die gepulste magnetomotive Optische Kohärenztomografie, 41 Seiten, 13 Abbildungen, Hochschule Mittweida (FH) - University of Applied Sciences, Fakultät Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik

Bachelorarbeit, 2013

## **Zusammenfassung**

Die optische Kohärenztomografie (OCT) ist ein Verfahren, welches unter Verwendung von kurzkohärenter elektromagnetischer Strahlung für die Bildgebung verwendet wird. Die optische Kohärenztomografie wird derzeit hauptsächlich in der biomedizinischen Forschung und Diagnostik angewandt und ist vergleichbar mit dem Ultraschallverfahren. Die OCT untersucht vom Objekt zurückgestreutes Licht mit einem Interferometer, um damit Tiefeninformationen des zu untersuchenden Objektes zu erhalten. Bei einer Eindringtiefe, die im Millimeterbereich liegt, erhält man bei der OCT eine Auflösung im Mikrometerbereich ( $\sim 10 \mu\text{m}$ ). Da die OCT ein vergleichsweise sehr junges Verfahren ist, gibt es verschiedene Ansätze, um ihre Anwendungen flexibler zu gestalten und um noch detailliertere Ergebnisse zu erzielen. Die magnetomotive OCT stellt eine dieser Weiterentwicklungen der herkömmlichen OCT dar und ermöglicht mit Hilfe der Doppler-OCT die dynamische Bildgebung von magnetischen Nanopartikeln, die über ein magnetisches Wechselfeld in mechanische Schwingungen versetzt werden. In dieser Arbeit wurde eine Schaltung entwickelt, welche das magnetische Wechselfeld impulsartig erzeugt, um so einen höheren Magnetfeldgradienten beziehungsweise höhere Magnetfeldstärken zu erhalten, ohne eine zu hohe thermische Belastung der Magnetspule zu verursachen. Die Schaltung wurde konzipiert, simuliert, aufgebaut und mittels magnetomotiver Bildgebung am Phantom validiert.

---

## Abstract

Optical coherence tomography (OCT) is a non-invasive imaging method which uses low coherent electromagnetic radiation to provide high resolution images. OCT is mainly used in biomedical research and diagnosis. It is similar to medical ultrasonography, but uses light waves instead of sound waves. Light is sent into the sample and a portion is backscattered. This portion is analysed with an interferometer in order to obtain information about the structure of the sample. The light penetration depth is in the millimeter range, its resolution is about  $10\text{ }\mu\text{m}$ . Because OCT is a new method, there are a lot of different approaches to make its application more flexible and achieve more accurate results. Magnetomotive OCT has been developed from conventional OCT. It allows dynamic imaging of magnetic nanoparticles with the help of Doppler-OCT. In this situation, magnetic particles are forced to move in an alternating magnetic field. In this thesis a circuit was built, which produced a pulsed magnetic field enabling higher magnetic flux density and reducing the thermal load of the solenoid. The circuit was built and validated by imaging of a phantom with a magnetomotive OCT-System.

# 1 Einleitung

*Our greatest weakness lies in giving up. The most certain way to succeed is always to try just one more time.*

---

Thomas A. Edison

Mit der fortschreitenden Forschung im Bereich der Optischen Kohärenztomografie (OCT) erkennt man immer breitere Anwendungsgebiete, bei denen die Vorteile der OCT zwingend notwendig sind [22]. Die sehr hohe Auflösung und der Umstand, nicht-invasiv arbeiten zu können [21], macht die OCT zu einem bildgebenden Verfahren, welches dafür prädestiniert ist, physiologische Abläufe und Zustände im lebenden Gewebe zu untersuchen.

Die zeitliche Auflösung der OCT ist trotzdem entsprechend hoch, sodass Echtzeitbildgebung an lebendem Gewebe durchgeführt werden kann. Leider hat die herkömmliche OCT ähnliche Nachteile wie die Sonografie. Alle Informationen, die aus der OCT gewonnen werden können, entstehen durch Unterschiede in verschiedenen Gewebeeigenschaften, sagen aber weniger über die Eigenschaften jedes einzelnen Gewebes aus. Die bedeutendsten Kriterien für die Darstellung des Gewebes in der OCT sind Streuung, Doppelbrechung und Bewegung.

Eine Möglichkeit, eine Zellart hervorzuheben beziehungsweise einen interessanten Bereich zu markieren, bietet die magnetomotive OCT, die, auf dem Prinzip der Doppler-OCT basierend, Bewegung über eine Dopplerverschiebung identifizieren kann. Um selbstgewählte Bereiche in Bewegung zu versetzen und erkennen zu können, musste eine Möglichkeit gefunden werden, diese Bereiche selektiv anzuregen. Dies wurde über magnetische und nur einige hundert Nanometer große Partikel realisiert, die in die interessanten Zellen hineingebracht werden und über ein äußeres magnetisches Wechselfeld zu Schwingungen angeregt werden können. Diese Schwingungen übertragen sich auf die Zellen, welche dadurch mit der Frequenz der Anregung mitschwingen. Elektromagnetische Strahlung, die auf diese Zellen trifft, ändert durch den Doppler-Effekt ihre Wellenlänge und kann hierdurch von der restlichen Strahlung, die im Gewebe reflektiert wird, unterschieden werden. Der dafür erforderliche Magnetfeldgenerator wurde bereits entwickelt [20], hat aber den Nachteil, dass es in kürzester Zeit zu einer starken Erwärmung kommt, was ein längeres Messen unmöglich macht, da es zum Zelltod oder der Zerstörung des Magneten kommen kann.

Ziel dieser Bachelorarbeit war es diese Erwärmung durch einen gepulsten Betrieb des Magneten zu vermeiden und gleichzeitig noch höhere Stromstärken und damit stärkere Magnetfelder zu erreichen.





## 2 Theoretische Vorbetrachtungen und Grundlagen

### 2.1 Magnetismus

Magnetismus ist ein Phänomen, welches sich durch eine Kraftwirkung zwischen zwei Magneten beziehungsweise einem Magneten und einer bewegten Ladung bemerkbar macht [10]. Analog zur Elektrostatik gibt es auch beim Magnetismus, der erstmals 624 vor Christus erwähnt wurde, zwei Pole, die je nach Kombination unterschiedliche Kraftwirkungen ergeben.

Der größte Unterschied zur Elektrostatik ist, dass es beim Magnetismus keine Monopole gibt. Das heißt, jeder Magnet besitzt immer zwei Pole. Diese Pole werden als Nordpol und sein Gegenpart als Südpol bezeichnet und bilden die Eintritts- und Austrittsstellen für die Feldlinien des magnetischen Feldes, welches die Ortsabhängigkeit der Kraft auf einen anderen Magneten beziehungsweise auf eine bewegte Ladung beschreibt. Dabei ist der Nordpol die Stelle, an der die Feldlinien aus dem Magneten austreten, während am Südpol die Feldlinien in den Magneten eintreten. Grund für die Namensgebung ist die Tatsache, dass sich beim Kompass der Stabmagnet so ausrichtet, dass er senkrecht zum Äquator steht und damit eine Hälfte hat, die nach Norden zeigt (arktischer Magnetpol) und eine nach Süden gerichtete (antarktischer Pol) [5].

Magnetische Felder können von unterschiedlichen Quellen erzeugt werden. Sie können von Dauermagneten erzeugt werden, entstehen durch die Bewegung elektrischer Ladungen oder werden verursacht durch die zeitliche Änderung eines elektrischen Feldes. Die Kraftwirkung von Magneten lässt sich prinzipiell so formulieren, dass sich gleiche Pole abstoßen und entgegengesetzte Pole anziehen. Bei bewegten elektrischen Ladungen  $q$  übt das magnetische Feld die so genannte Lorentzkraft  $\vec{F}_L$  auf die Ladungen aus.

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

Die Lorentzkraft ist demnach proportional zur Geschwindigkeit  $\vec{v}$  der bewegten Ladung, zur Ladung  $q$  und zur magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$ . Zudem steht sie senkrecht zur Bewegungsrichtung und zu den Feldlinien des magnetischen Feldes. Bei der Wirkung auf Magnete oder magnetisierbare Körper verhält es sich so, dass sich die Körper immer antiparallel der Feldlinien ausrichten. Das heißt, dass sich der magnetische Südpol eines Körpers entlang der Feldlinien zum magnetischen Nordpol des Felderzeugers ausrichtet. Das bedeutet, dass der geografische Nordpol der magnetische Südpol ist, da sich der Nordpol des Kompasses zu dem Gegenpol des Magneten ausrichtet, in dessen Feld er sich befindet. Handelt es sich bei den Magnetfeldern um inhomogene Felder, dann wirkt auch nach der Ausrichtung eine Kraft auf die Magnete, die dafür sorgt, dass sich die Magnete anziehen. Grund dafür ist, dass das System versucht einen

Zustand geringerer Energie herzustellen. Die Gesamtenergie des Feldes der beiden Magnete nimmt unter der Kraftwirkung ab, wenn die Magnete der Kraftwirkung folgen können. Da dementsprechend die Änderung des Magnetfeldes (örtlich oder zeitlich) für die Kraftänderung verantwortlich ist, spielt zur Beschreibung der Kraft  $F$  der Gradient des Magnetfeldes  $\nabla B$  eine Rolle.

$$F \sim \nabla B \quad (2.2)$$

Daraus ergibt sich, dass das Magnetfeld möglichst inhomogen sein muss, damit eine große Kraft auf Magnete in diesem Magnetfeld wirkt.

Die Art und Weise, wie sich ein Körper in einem Magnetfeld verhält, ist abhängig vom Typ des Stoffes, aus dem der Körper besteht. Festkörper lassen sich grob in drei Typen unterteilen.

### 2.1.1 Diamagnetismus

Als Diamagnetismus bezeichnet man den Effekt, dass ein Körper durch den Einfluss eines magnetischen Feldes ein eigenes Magnetfeld erzeugt, das dem ursprünglichen Magnetfeld entgegen gerichtet ist und es dementsprechend innerhalb des Körpers abschwächt [14]. Emil Lenz hat diesen Effekt erstmals in seinen Überlegungen erwähnt, weswegen dieses Prinzip nach ihm benannt wurde. Die sogenannte Lenzsche Regel wird heutzutage so formuliert:

“Die durch Änderung des magnetischen Flusses durch eine Leiterschleife induzierte Spannung ist stets so gerichtet, dass der dadurch fließende Strom ein Magnetfeld erzeugt, welches der Änderung des magnetischen Flusses entgegenwirkt.”<sup>1</sup>

Das neu erzeugte Feld entsteht durch einen Strom, der durch das äußere Magnetfeld in den Elektronenhüllen der Atome des Festkörpers induziert wird. Aufgrund der Gegenläufigkeit der Feldlinien der beiden magnetischen Felder ist der Körper bestrebt, das äußere anliegende Magnetfeld zu verlassen, sofern dieses äußere Magnetfeld inhomogen ist. Bei homogenen Feldern wäre die Kraftwirkung der magnetischen Felder an allen Stellen gleich groß und die Gesamtkraft, die auf den Körper wirken würde, wäre Null. Da die Stärke des induzierten magnetischen Feldes abhängig ist von der Stärke der Ströme in den Atomen des Körpers und diese wiederum abhängig sind von der Stärke des äußeren Magnetfeldes, ist das induzierte Magnetfeld direkt abhängig von der Stärke des äußeren Magnetfeldes. Das bedeutet, dass ein diamagnetischer Körper

<sup>1</sup> Echternkamp, K. (2011). (G. A. Göttingen, Herausgeber) Abgerufen am 24. April 2013 von <http://lp.uni-goettingen.de/get/text/6521>

in einem ausreichend starken, inhomogenen Magnetfeld schweben kann, wenn die abstoßende Kraft der Magnetfelder größer ist als die Gewichtskraft des Körpers. Beispiele für solche Stoffe sind Kohlenstoff und Bismut.

### 2.1.2 Paramagnetismus

In Materie, die man als paramagnetisch bezeichnet, verhalten sich die Atome modellhaft wie kleine Stabmagnete, die man zwar drehen kann, die aber fest an ihrer Position verharren. Bringt man einen Paramagneten in ein äußeres Magnetfeld, werden sich im Modell die Stabmagneten so ausrichten, dass sie in Richtung der Feldlinien liegen. Damit wird das Material magnetisch und in einem inhomogenen Magnetfeld in dieses hineingezogen. Paramagnetische Materie besteht immer aus Atomen, die ungepaarte Elektronen besitzen und die ein magnetisches Moment  $\vec{m}$  aufweisen. Das heißt, bei einem äußeren Magnetfeld mit der Flussdichte  $\vec{B}$ , welches auf die Atome wirkt, entsteht ein Drehmoment  $\vec{M}$ , das die Atome in Feldrichtung dreht [15].

$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B} \quad (2.3)$$

Die Atome untereinander beeinflussen sich allerdings nicht. Auch wenn sie ein magnetisches Moment besitzen, ist dieses zu schwach, um umliegende Nachbaratome zu verdrehen. Geringste Energiezufuhren, zum Beispiel in Form von Wärme, reichen aus, um eine Neuorientierung der Atome zu bewirken. Durch die riesige Anzahl Atome auch in kleinsten Proben, besitzt die Probe kein von außen spürbares Magnetfeld, aufgrund der statistischen Verteilung der magnetischen Momente, die sich zu Null addieren. Bringt man den Paramagneten in ein Magnetfeld hinein, wird dieses aber sehr wohl verstärkt. Eine große Gruppe von Vertretern des Paramagnetismus sind die Alkalimetalle, zu denen zum Beispiel Lithium und Natrium gehören.

### 2.1.3 Ferromagnetismus

Der größte Unterschied zum Paramagnetismus ist, dass die Elementarteilchen von Ferromagneten parallel zueinander ausgerichtet sind. Damit sind Ferromagneten in der Lage, ein eigenes statisches Magnetfeld zu erzeugen beziehungsweise verhalten sich im Magnetfeld wie Paramagneten. Das heißt, sie werden von dem Pol eines externen Magnetfeldes angezogen. Da auch beim Ferromagnetismus die Atome ein magnetisches Moment besitzen, lassen sie sich durch ein externes Magnetfeld beeinflussen; allerdings alle Atome etwa gleich stark im Gegensatz zum Paramagnetismus. Daraus folgt, dass das magnetische Feld des Ferromagneten nicht in seiner Stärke, sondern nur in seiner Richtung durch das äußere Feld beeinflusst wird. Die einzigen Stoffe des Periodensystems der Elemente die ferromagnetisch sind, sind Eisen, Cobalt und Nickel

[13].

Die für die magnetomotive optische Kohärenztomografie verwendeten Nanopartikel sind superparamagnetisch, was bedeutet, dass sie prinzipiell paramagnetische Eigenschaften aufweisen, aber ein ferromagnetisches Verhalten zeigen, wenn sie sich innerhalb eines starken magnetischen Feldes befinden. Dadurch kommt es zur Bewegung der Partikel in inhomogenen magnetischen Feldern. Da biologisches Gewebe diamagnetisch ist, wird es sich innerhalb eines Magnetfeldes nicht bewegen.

## 2.2 Elektromagnetismus

1820 beobachtete der dänische Physiker Hans Christian Ørsted die Krafteinwirkung auf zwei stromdurchflossene Leiter und gab damit den ersten Hinweis auf den Zusammenhang zwischen Magnetismus und Elektrizität. Etwa 1864 formulierte James Clerk Maxwell [6] dieses Phänomen, woraus später die Maxwellschen Gleichungen wurden. Diese Maxwellschen Gleichungen bilden die Grundlage zur Beschreibung des Elektromagnetismus und erklären zusammen mit der Lorentzkraft alle Phänomene der Elektrodynamik. Dementsprechend sind die Gleichungen von Maxwell auch die Grundlage für die Optik und die Elektrotechnik.

Wie bereits erwähnt, sind bewegte Ladungsträger, in diesem Fall die Elektronen des Stromflusses, für das Entstehen eines Magnetfeldes verantwortlich. Die Beschleunigung der Elektronen auf Kreisbahnen bewirkt das Aussenden von elektromagnetischer Strahlung, die als Vermittlungsstrahlung der Wechselwirkung, die das Magnetfeld verursacht, wirkt. Das heißt, die Kraftwirkung zwischen zwei Magneten entsteht durch den Austausch von Photonen. Die Felder, die sich dabei um stromdurchflossene Leiter bilden, stehen senkrecht zur Bewegungsrichtung der Elektronen und besitzen keinen Nord- oder Südpol wie bei Permanentmagneten. Trotzdem würde sich ein Magnet, den man in ein solches Feld gibt, immer in derselben Art und Weise ausrichten, was daran liegt, dass man die Feldlinien als konzentrische Kreise um den Leiter sehen kann, die eine bestimmte Drehrichtung haben [12]. Der Magnet wird sich immer so ausrichten, dass die Feldlinien in den Südpol eintreten und aus dem Nordpol herauskommen. Das Kriterium, welches ausschlaggebend für die Richtung der Magnetfelder ist, ist die Richtung, in die sich der Strom durch den Leiter bewegt. Stellt man sich den Leiter so vor, dass man in die Bewegungsrichtung der Elektronen blickt, drehen die Feldlinien gegen den Uhrzeigersinn.

Mit dem Wissen, dass magnetische Felder über stromdurchflossene Leiter hergestellt werden können, ergab sich die Möglichkeit Magnete zu bauen, die abschaltbar waren. Ein fehlender Stromfluss bedeutet, dass keine bewegten Elektronen vorhanden sind, die ein magnetisches Feld erzeugen könnten.

Auch die Tatsache, dass sich die Magnetfelder durch eine Umkehrung des Stromflusses sehr einfach umdrehen lassen, ermöglicht es, magnetische Wechselfelder zu bauen, die nicht mehr mechanisch gedreht werden müssen und damit um einiges schneller und si-

cherer geschaltet werden können.

## 2.3 Elektrizität

Elektrizität ist ein Oberbegriff für Erscheinungen, welche durch magnetische oder elektrische Felder sowie bewegte oder statische elektrische Ladungen entstehen [9]. Diese Ladungen sind Elektronen, Protonen oder Ionen, welche positiv oder negativ sein können. Gleichnamige Ladungsträger stoßen sich ab und ungleichnamige Ladungsträger ziehen sich gegenseitig an. Im Gegensatz zum Magnetismus, wo es keine Monopole gibt, existieren in der Elektrizität sowohl Monopole als auch Dipole. Das bekannteste Beispiel für Elektrizität ist der elektrische Strom, welcher eine Bewegung von Ladungsträgern bezeichnet und in der Einheit Ampere (A) gemessen wird. Die Definition der Stromstärke lautet:

“1 A ist die Stärke des zeitlich konstanten elektrischen Stromes, der im Vakuum zwischen zwei parallelen, unendlich langen, geraden Leitern mit vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt und dem Abstand von 1 m zwischen diesen Leitern eine Kraft von  $2 \cdot 10^{-7}$  Newton pro Meter Leiterlänge hervorrufen würde.”<sup>2</sup>

Das heißt, dass der Stromfluss eine magnetische Wirkung zur Folge hat. Die Bewegung von Ladungsträgern hat außer der magnetischen auch eine thermische und chemische Wirkung. Die chemische Wirkung sieht man beispielsweise an Leuchtstoffröhren, welche durch Ionisation, bedingt durch die Stöße der Ladungsträger mit den Gasatomen in der Röhre und der Rekombination, Photonen im sichtbaren Bereich emittiert. Die thermische Wirkung (wobei hier ausschließlich Stoffe beachtet werden, die einen Temperaturkoeffizienten von  $\alpha_{t_0} > 0$  besitzen, zum Beispiel Kupfer) des Stromes hängt auch mit Stößen zusammen, welche aber nicht ionisierend wirken, sondern die betroffenen Teilchen zu Schwingungen anregen, welche sich als Wärme an Grenzschichten äußern. Durch die Stoßprozesse verringert sich auch die Geschwindigkeit der fließenden Ladungsträger. Bauelemente oder Stoffe, die eine messbare Verringerung des Stromflusses verursachen werden als Widerstände bezeichnet. In der Elektrotechnik ist der Widerstand  $R$  ein Maß dafür, welche elektrische Spannung  $U$  nötig ist, um einen bestimmten Strom  $I$  durch einen Leiter fließen zu lassen.

$$R = \frac{U}{I} \quad (2.4)$$

<sup>2</sup> Das Internationale Einheitensystem (SI). Deutsche Übersetzung der BIPM-Broschüre “Le Système international d’unités/The International System of Units (8e édition, 2006)”. In: PTB-Mitteilungen. 117, Nr. 2, 2007 (übersetzt von Cecile Charvieux), S. 156

Leiter sind hier elektrische Leiter, welche frei bewegliche Ladungsträger besitzen und somit einen Stromfluss erlauben. Der Begriff Spannung wird hier verwendet als ein Maß für die Arbeit, die nötig ist, um eine Ladung in einem elektrischen Feld zu bewegen.

Die Energie, die durch den Widerstand in Wärme  $W$  umgewandelt wird, kann angegeben werden durch

$$W = U \cdot I \cdot \Delta t. \quad (2.5)$$

Hierbei ist  $\Delta t$  die Zeit, in der Strom durch den Widerstand fließt.

Der Stromfluss und der Spannungsabfall über dem Leiter bewirken eine Erwärmung des Drahtes, da die elektrische Leistung  $P$ , in Kaltleitern komplett in Wärmeenergie umgesetzt wird. Kaltleiter sind Stoffe, die einen Temperaturkoeffizienten von  $\alpha_{t_0} > 0$  besitzen.

Das hat zur Folge, dass der Stromfluss innerhalb des Drahtes abnimmt, da der Widerstand eines Drahtes eine temperaturabhängige Größe ist, die mit steigender Temperatur  $T$  zunimmt [7].

$$R(T) = R(T_0) \cdot (1 + \alpha_{t_0} \cdot (T - T_0)) \quad (2.6)$$

### 2.3.1 Spule

Bei Spulen handelt es sich auch in der Elektrotechnik um Bauteile, deren Bauform durch eine Wicklung gekennzeichnet ist. Spulen werden zur Erzeugung oder Detektion von Magnetfeldern genutzt oder aufgrund ihrer Induktivität [3]. Induktivität ist eine Eigenschaft, die alle elektrischen Stromkreise aufweisen, aber bei Spulen besonders stark auftritt und nutzbar für die Schaltung eingebracht werden kann. Die Induktivität  $L$  beschreibt die zeitliche Änderung des elektrischen Stromes bei einer Spannung  $u$ . Für Momentanwerte zeitlich veränderlicher Größen werden folgend Kleinbuchstaben verwendet.

$$u = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.7)$$

Diese Erscheinung folgt aus dem Ampèreschen Gesetz und dem Induktionsgesetz, welche aussagen, dass ein Strom ein Magnetfeld hervorruft, dessen Ausprägung dem Strom proportional ist (Ampèresches Gesetz für Vakuum)

$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{j} \quad (2.8)$$

und dass ein sich änderndes Magnetfeld einen Strom in einem elektrischen Leiter induziert, der sich in dem Magnetfeld befindet (Induktionsgesetz [11]).

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \quad (2.9)$$

Das bedeutet, wenn eine Spule von einem wachsenden Strom durchflossen wird, entsteht ein wachsendes Magnetfeld, welches seinerseits wieder einen Strom induziert. Dieser Strom ist jedoch entgegen dem Strom gerichtet, der zum Aufbau des Magnetfeldes geführt hat. Dies erschließt sich aus dem Induktionsgesetz, das den Zusammenhang zwischen dem erzeugten elektrischen Feld  $\vec{E}$  und der verursachenden magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  abgibt.

Diese beiden Gleichungen beschreiben das Ampèresche Gesetz (2.8) und das Induktionsgesetz (2.9) mathematisch und man erkennt aus dem negativen Vorzeichen des Induktionsgesetzes, dass sich der wachsende Stromfluss durch die Erzeugung eines Magnetfelds, welches einen Strom induziert, selbst behindert.

Die Induktion einer Spule zu berechnen, ist bei einfachen Spulen noch möglich. Luftspulen, deren Länge  $l$  sehr viel größer ist als der Durchmesser des Querschnittes  $A$  der Spule, können bezüglich ihrer Induktivität bestimmt werden mit:

$$L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 A}{l} \quad (2.10)$$

Hierbei ist  $N$  die Windungszahl und  $\mu_0$  die magnetische Feldkonstante beziehungsweise Induktionskonstante, welche unter anderem dazu genutzt wird, Magnetfelder zu beschreiben [19]. Für komplexere Spulen wird es schnell kompliziert die Induktivität rechnerisch zu bestimmen und ist meistens nur durch die Finite-Elemente-Methode oder durch starke Vereinfachung möglich. Auch bei komplexeren Spulen ist die Induktivität dennoch abhängig vom Quadrat der Windungszahl.

### 2.3.2 Komplexer Widerstand

Ein wichtiger Bereich der Elektrotechnik ist die Bestimmung des Verhältnisses von Spannung zu Stromstärke. Wie in den vorherigen Kapiteln erwähnt, entspricht das Verhältnis von Gleichspannung zu Gleichstrom dem elektrischen (ohmschen) Widerstand. In Wechselstromkreisen verhält es sich nicht so einfach, da Spannung und Strom einen sinusförmigen Verlauf besitzen. Wenn sich nur reine ohmsche Elemente in dem Stromkreis befinden, verhält sich das Spannungs-Strom-Verhältnis wie in einer Gleichstromschaltung. Induktive und kapazitive Lasten können dieses Verhältnis verändern. Für Spulen und Kondensatoren ist das Verhältnis zeitlich nicht konstant und wird beeinflusst durch die Induktivität der Spulen und Kapazitäten  $C$  der Kondensatoren [16]. Zur ma-

thematischen Beschreibung werden Kleinbuchstaben für Momentanwerte zeitlich veränderlicher Größen verwendet.

$$\frac{di}{dt} = \frac{u}{L} \quad (2.11)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{i}{C} \quad (2.12)$$

Fließt ein sinusförmiger Wechselstrom der Form

$$i(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (2.13)$$

durch die Spule, ergibt sich, nach den Ableitungsregeln der Trigonometrie, eine Spannung von

$$u(t) = \omega L \cdot I_0 \cdot \cos(\omega t) \quad (2.14)$$

Bekanntermaßen ist  $\sin(\alpha 90^\circ) = \cos(\alpha)$ . Das heißt, die Spannung eilt dem Strom um  $90^\circ$  voraus.

Diese Phasenverschiebung führt zu einem komplexen Widerstand. Der komplexe Widerstand der Spule ist der Quotient aus Amplitude der Spannung und Amplitude des Stromes. Da diese zeitlich versetzt am Bauelement auftreten, ist der komplexe Widerstand größer als der tatsächliche. Der Zusammenhang zwischen komplexen Widerstand und Blindwiderstand (also dem Anteil des komplexen Widerstands, der durch die Phasenverschiebung entsteht) ist nicht linear. Man kann sich den komplexen Widerstand als Zeiger (siehe ??) in der komplexen Zahlenebene vorstellen, dessen Länge dem Widerstandswert entspricht. Dabei ist der imaginäre Anteil des Zeigers der Blindwiderstand und der reelle Anteil der tatsächliche ohmsche Wirkwiderstand. Die Phasenverschiebung ist der Winkel des Zeigers zur Abszisse.

Betrachtet man  $\underline{u}$  und  $\underline{i}$  als komplexe Größen, mit

$$\underline{i} = \hat{i} \cdot (\cos(\omega t + \varphi_i) + j \cdot \sin(\omega t + \varphi_i)) \quad (2.15)$$

ergibt sich, nach Differenziation die komplexe Form



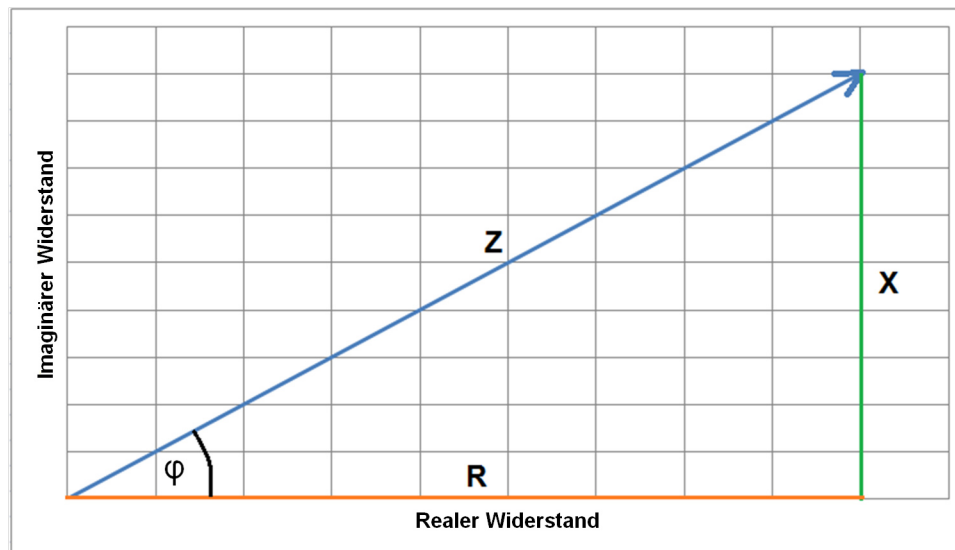


Abbildung 2.1: Darstellung des komplexen Widerstands im Zeigerdiagramm. R ist der Anteil des ohmschen Widerstands, X der Anteil des imaginären Widerstands und Z der komplexe Widerstand

$$\frac{\underline{u}}{L} = \frac{d\underline{i}}{dt} = \hat{i} \cdot e^{j \cdot (\omega t + \varphi_i)} \cdot j\omega \quad (2.16)$$

Berechnet man jetzt den Widerstand Z einer idealen Spule aus den komplexen Größen  $\underline{u}$  und  $\underline{i}$ , ergibt sich

$$Z = \frac{\underline{u}}{\underline{i}} = j \cdot \omega L \quad (2.17)$$

Da sich bei einer idealen Spule der komplexe Widerstand nur aus dem imaginären Widerstand (Blindwiderstand) X zusammensetzt, gilt dafür

$$X = \omega L = 2\pi f \cdot L \quad (2.18)$$

Die Beziehung zwischen komplexem Widerstand, Blindwiderstand und ohmschem Widerstand entspricht der eines rechtwinkligen Dreiecks. Wie in der komplexen Zahlenebene, lässt sich hier jeder Widerstand einfach berechnen, solange die beiden anderen bekannt sind. Es gilt

$$Z^2 = R^2 + X^2 \quad (2.19)$$

### 2.3.3 Kondensator

Eine Möglichkeit Strom beziehungsweise elektrische Energie zu speichern bietet der Kondensator. Kondensatoren sind passive Bauelemente und besitzen damit keine Steuerungsfunktion und keine Verstärkungswirkung. Sie stellen durch ihre Bauform prinzipiell eine Unterbrechung im Stromkreis dar, da sie aus zwei sich nicht berührenden leitenden Flächen bestehen, zwischen denen sich eine isolierende Schicht befindet, zum Beispiel ein Dielektrikum. Allerdings funktioniert der Kondensator auch im Vakuum (ohne Dielektrikum). Die Kondensatorflächen werden als Elektroden bezeichnet.

Kondensatoren speichern elektrische Energie in Form von Feldenergie. Das Feld wird dabei zwischen den Elektroden aufgebaut, die nach Aufladen des Kondensators unterschiedlich geladen sind. Der Auflade- und Entladevorgang werden später genauer beschrieben. Die Energie, die im Feld gespeichert ist, ist abhängig von der Kapazität  $C$  des Kondensators und der Spannung, mit der der Kondensator aufgeladen ist.

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (2.20)$$

Die elektrische Kapazität des Kondensators ist eine Größe, welche aussagt, wie groß die Ladungsmenge  $Q$  ist (einfach gesagt die Anzahl der Elektronen auf der technisch positiven Elektrode), die sich bei einer bestimmten Spannung, auf den Elektroden aufhält.

$$Q = C \cdot U \quad (2.21)$$

Man kann verallgemeinern, dass die Kapazität eines elektrischen Kondensators von den Flächen  $A$  der beiden Elektroden abhängt, dem Abstand  $d$  zwischen den Elektroden und der Permittivität  $\epsilon$  des Dielektrikums. Die Permittivität ist die Durchlassfähigkeit eines Materials für elektrische Felder. Am Beispiel eines einfachen Plattenkondensators gilt

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (2.22)$$

In Gleichstromschaltungen kann der Strom das Dielektrikum nicht passieren, weswegen sich hier Kondensatoren durch die Spannungsunterschiede so aufladen, dass die Elektrode, die an die positive Versorgungsspannung angeschlossen ist, sich auch positiv auflädt. Der Kondensator wird auf die gleiche Spannung aufgeladen, an die er angeschlossen ist. Da aber zum Aufladen eine Spannungsdifferenz gegeben sein muss und diese sich mit fortschreitendem Aufladen verringert, verringert sich ebenso der Aufladestrom. Das führt zu einer zeitabhängigen Ladekurve:

$$U(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2.23)$$

Die Entladekurve sieht analog dazu folgendermaßen aus:

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.24)$$

In beiden Gleichungen hat  $U_0$  allerdings eine unterschiedliche Bedeutung. Im Ladevorgang ist es die Ladespannung, die außen an den Kondensator anliegt und beim Entladen ist es der Anfangswert der Spannung des Kondensators.

Beim Entladen nimmt die Spannung  $U$ , mit welcher der Kondensator aufgeladen ist, exponentiell mit der Zeit  $t$  ab und ist ebenfalls abhängig von der Zeitkonstanten  $\tau$ . Diese Zeitkonstante ist das Produkt aus Kapazität und Lastwiderstand und lässt Aussagen über das Entladeverhalten eines Widerstand-Kondensator-Aufbaus zu. Für das Aufladeverhalten muss entsprechend der Ladewiderstand berücksichtigt werden

$$\tau = R \cdot C \quad (2.25)$$

Anhand der Gleichungen (2.23) und (2.24) sieht man, dass mit steigendem  $\tau$  auch die Zeit steigt, bis der Kondensator vollständig aufgeladen beziehungsweise entladen ist. Dies ist dadurch bedingt, dass der Widerstand den Ladestrom begrenzt. Je höher der Widerstand ist, umso geringer ist der Stromfluss (Gleichung (2.4)) zum Kondensator (Aufladen) oder vom Kondensator (Entladen). Je höher die Kapazität ist, umso größer ist die Ladung, die auf den Kondensator gebracht werden muss, um die Aufladespannung zu erreichen (siehe (2.21)).

Da der exponentielle Term der Gleichung (2.23) dafür sorgt, dass es unendlich lange dauern würde, bis der Kondensator komplett aufgeladen beziehungsweise entladen ist (siehe (2.24)), definiert man Zeitspannen für die der Kondensator vollständig aufgeladen beziehungsweise entladen ist. Nach einer Zeit von  $t = 5 \cdot \tau$  ist der Kondensator beim Aufladen auf ungefähr 99% der maximalen Spannung angestiegen und der Kondensator gilt damit, als voll aufgeladen. Beim Entladen ist die Spannung nach dieser Zeit auf 1% abgesunken und gilt damit als vollständig entladen.

## 2.4 Magnetfelderzeugung durch Spulen

Spulen werden häufig auf einen Spulenkörper aufgewickelt, welcher ihnen Stabilität gibt, eine Form vorschreibt, ihre Induktivität beeinflusst oder die entstehenden Magnetfeldlinien beeinflusst. Besteht der Spulenkern (= Spulenkörper) aus ferromagnetischem Material, zum Beispiel Eisen, so wird zusätzlich die magnetische Flussdichte  $B$  der Spule

stark erhöht. Die Beziehung lautet

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot I \cdot \frac{N}{l} \quad (2.26)$$

Dabei ist  $\mu_r$  die magnetische Permeabilität,  $\mu_0$  ist die magnetische Feldkonstante ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$ ),  $I$  der Stromfluss durch die Spule und  $\frac{N}{l}$  der Quotient Windungszahl der Spule geteilt durch Länge der Spule. An dieser Gleichung sieht man, dass der magnetische Fluss direkt proportional zum elektrischen Strom ist, der durch die Spule fließt.

## 2.5 Optische Kohärenztomografie

### 2.5.1 Grundlagen

Die optische Kohärenztomografie (OCT) ist ein Verfahren, welches unter Verwendung von kohärenter elektromagnetischer Strahlung nicht-invasiv hochauflösend zur Bildgebung verwendet wird. Die optische Kohärenztomografie wird derzeit hauptsächlich in der biomedizinischen Forschung und Diagnostik angewandt und ist vergleichbar mit dem Ultraschallverfahren. Über einen Laser oder eine Superlumineszenzdiode (SLD) wird breitbandiges kurzkohärentes Licht (Licht mit einem breiten Spektrum) auf einen Strahlteiler geschickt, von wo ein Strahl auf das zu untersuchende Gewebe geschickt wird und der andere auf einen Referenzspiegel. Der Strahl, der in das Gewebe geleitet wurde (Probenstrahl), wird dort teilweise gestreut, absorbiert und reflektiert. Der Anteil, der reflektiert und gestreut wird, gelangt wieder auf den Strahlteiler wo er wieder mit dem Strahl, der von dem Referenzarm (Referenzstrahl) kommt, interferiert. Der so entstehende Strahl wird auf einen Detektor gelenkt, welcher die Interferenzerscheinung analysiert. Dieses Messverfahren basiert auf dem Prinzip des Michelson-Interferometers.

Die Interferogramme geben eine Aussage darüber, wie reflektierende Strukturen in dem untersuchten Bereich verteilt sind. Dieser Modus des OCT ist der sogenannte A-Scan (amplitude-mode scan), bei dem die Intensität des reflektierten Lichtes in Abhängigkeit der Eindringtiefe gemessen wird. Die Eindringtiefe, bis die Kohärenz des Lichtes durch Streuung soweit reduziert wird, dass sie nicht mehr detektierbar ist, beträgt circa  $1 - 2 \mu m$ . Da die Interferenzerscheinungen nur bei Gangunterschieden innerhalb der kurzen Kohärenzlänge der Lichtquelle auftreten können, lässt sich so ein hohes axiales Auflösungsvermögen im Bereich von  $10 \mu m$  realisieren.

Tastet man das Untersuchungsobjekt mit dem Probenstrahl in transversaler Richtung ab und kodiert die Intensität des reflektierten Lichts mit einer Helligkeit, erhält man ein Schnittbild des untersuchten Gewebes. Diese Art der Nutzung des OCT heißt B-Scan (brightness-mode scan). Mit der Durchführung in zwei Raumrichtungen erhält man die Information für ein dreidimensionales Bild.

Die OCT hat gegenüber anderen bildgebenden Verfahren auch den großen Vorteil, dass

die transversale Auflösung von der longitudinalen entkoppelt ist, da die transversale Auflösung von der numerischen Apertur abhängig ist, also der fokussierenden Wirkung der verwendeten Linsen. Die axiale (oder longitudinale) Auflösung  $\Delta z$  ist hingegen von der spektralen Breite  $\Delta\lambda$  und der Wellenlänge  $\lambda_0$  des verwendeten Lichtes abhängig (die Gleichung gilt nur für gaußförmige Spektren).

$$\Delta z = \frac{2 \cdot \ln(2) \cdot \lambda_0^2}{\pi \cdot \Delta\lambda} \quad (2.27)$$

## 2.5.2 Doppler-OCT

Wie auch beim Ultraschall bietet die OCT die Möglichkeit Bewegungen, von rückstreuenden oder reflektierenden Strukturen sichtbar zu machen. Dies wird durch eine veränderte Phasenbeziehung des Interferenzspektrums durch die sich ändernde Länge des Probenstrahls zwischen zwei A-Scans einer Probe ermöglicht. Wenn man zwei Interferenzspektren betrachtet, die in zwei aufeinanderfolgenden A-Scans an einem streuenden sich bewegenden Objekt reflektiert werden, kann mithilfe der Zweistrahlinterferenzgleichung für beide Interferenzspektren

$$I_1(\lambda) = \hat{I}_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda \cdot n \cdot 2 \cdot z_1}\right) \quad (2.28)$$

$$I_2(\lambda) = \hat{I}_2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda \cdot n \cdot 2 \cdot z_2}\right) \quad (2.29)$$

die Phasendifferenz  $\Delta\Phi$  berechnet werden. Über die Beziehung  $z_2 = z_1 + v_z \cdot t_{A-Scan}$  ergibt sich

$$\Delta\Phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot n \cdot v_z \cdot t_{A-Scan} \quad (2.30)$$

Hierbei ist  $v_z$  die axiale Geschwindigkeitskomponente des reflektierenden Objekts,  $t_{A-Scan}$  die Zeitdifferenz zwischen den beiden A-Scans und  $n \cdot 2 \cdot z$  der optische Gangunterschied (mit dem Brechungsindex  $n$  und der geometrischen Tiefe  $z$ ). Mit dieser Technik lassen sich kleine Bewegungen, die unterhalb der strukturellen Auflösungsgrenze des OCT-Systems liegen, hochsensitiv detektieren.



### 3 Stand der Technik

Die Schaltung sollte den bestehenden OCT-Aufbau um die Möglichkeit erweitern, gepulste Magnetfelder zur Bewegungsanregung der Nanopartikel zu nutzen. Dieser bestehende Aufbau wird in diesem Kapitel kurz beschrieben.

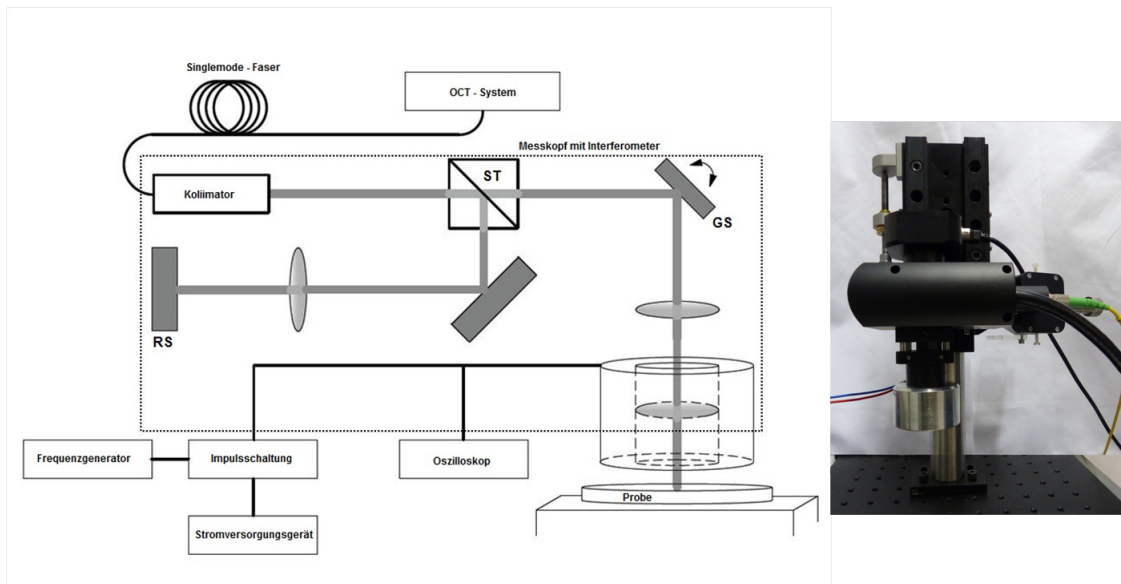


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau des OCT-Systems und Foto des OCT-Messkopfes mit Magnet

Das hier genutzte OCT-System (3.1) verwendet eine Lichtquelle mit einer großen spektralen Breite, die einen Strahl auf den Strahlteiler ST schickt. Dort wird der Strahl in Proben- und Referenzstrahl geteilt. Der Probenstrahl trifft auf Galvanometerspiegel (GS), die das Licht auf die Probe lenken. Von der Probe wird der rückgestreute Strahl wieder in das OCT-System eingekoppelt. Der Referenzstrahl geht vom Strahlteiler auf den Referenzspiegel (RS), von wo aus er ebenfalls in das OCT-System zurückgeführt wird, wo er mit dem Probenstrahl interferiert.

Auf der rechten Seite der Abbildung ist der OCT-Messkopf zusammen mit dem zylinderförmigen Magneten dargestellt. Eine fokussierende Optik, die den Strahl auf die Probe lenkt, ist in der Mitte des Magneten positioniert, welcher dafür über eine Gewindebohrung, entsprechend der Linsenhalterung, verfügt.





## 4 Material und Methoden

Zwischen Messkopf und Probe befindet sich die für die magnetomotive OCT verwendete Magnetspule, welche über die Impulsschaltung mit Strom versorgt wird. Die Impulsschaltung wird von einem Labornetzteil, welches bis zu 120 V Gleichspannung liefert, mit Strom und Spannung versorgt und von einem Frequenzgenerator gesteuert.

Die Schaltung sollte so konzipiert werden, dass die verwendete Spule kurzzeitig mit einem hohen Strom versorgt wird, ohne dass dabei sehr hohe elektrische Leistungen über den Bauteilen abfallen. Dazu soll ein Kondensator über einen Ladewiderstand aufgeladen werden und sich dann über die Spule in kurzer Zeit wieder entladen. Die Zeit, die der Kondensator benötigt um sich zu entladen, sollte möglichst der Dauer eines B-Scans (etwa 40 ms entsprechen, damit alle Nanopartikel, innerhalb des Bildbereiches, während dieses B-Scans zu Bewegungen angeregt werden. Das heißt die Zeitkonstante  $\tau$  sollte etwa 20 ms betragen. Durch die Spule sollten ungefähr 27 A fließen um ein Magnetfeld zu erzeugen, welches circa vier mal größer ist als die in Vorarbeit erzeugten Felder [23]. Dazu musste der Widerstand der Spule rund 3  $\Omega$  betragen. Um mit diesem Wert die vorgegebene Zeitkonstante zu erreichen, muss die Kapazität des Kondensators, laut Gleichung (2.25) 5 mF betragen. Für die Umsetzung der Schaltung wurde ein Kondensator mit gemessenen 4,2 mF und eine Spule mit einem Widerstand von 3,5  $\Omega$  gewählt.

Die Aufbauten des OCT-Systems und der Schaltung stellten gewisse Anforderungen an den verwendeten Elektromagneten. Zum einen sollte der Elektromagnet die passende Form haben und zum anderen dabei die passenden Werte für Induktivität und Widerstand besitzen. Die Form wurde maßgeblich durch den OCT-Aufbau bestimmt. Dieser hat die Möglichkeit mit einem Lichtmikroskop gekoppelt zu werden. Dabei ist der Platz den der Magnet einnehmen darf stark begrenzt. Hinzu kommt, dass es für die bereits vorhandenen Magneten in Vorarbeit [23] eine speziell angepasste Kühlschelle gebaut wurde, welche dafür sorgt, dass sich die Magneten während des Einsatzes nicht zu stark erhitzen. Der Elektromagnet sollte ebenfalls so gestaltet sein, dass die Kühlschelle um den Magneten gelegt werden kann. Um dies zu gewährleisten wurde ein bereits vorhandener Magnet aufgefräst um den Topf für den selbstgebauten Magneten zu erhalten. Anschließend wurde ein Spulenkörper aus PVC gefertigt. Um den Spulenkörper wurde dann der Spulendraht per Hand gewickelt und in dem Topf mit Epoxidharz vergossen.

Die Spule selbst verfügt über circa 400 Windungen eines lackierten Kupferdrahtes mit einem Durchmesser von 0,5 mm. Der aufgewickelte Spulendraht ist 33 m lang. Der mittlere Durchmesser der Spule beträgt rund 30 mm. Mit diesen Werten wurde der benötigte Widerstand von 3,5  $\Omega$  erreicht, welcher so gewählt wurde, dass ein genügend hoher

Strom durch die Spule fließt, um ein möglichst großes Magnetfeld zu erzeugen, ohne dass die Induktivität der Spule so groß wird, dass sie stark strombegrenzend wirkt.

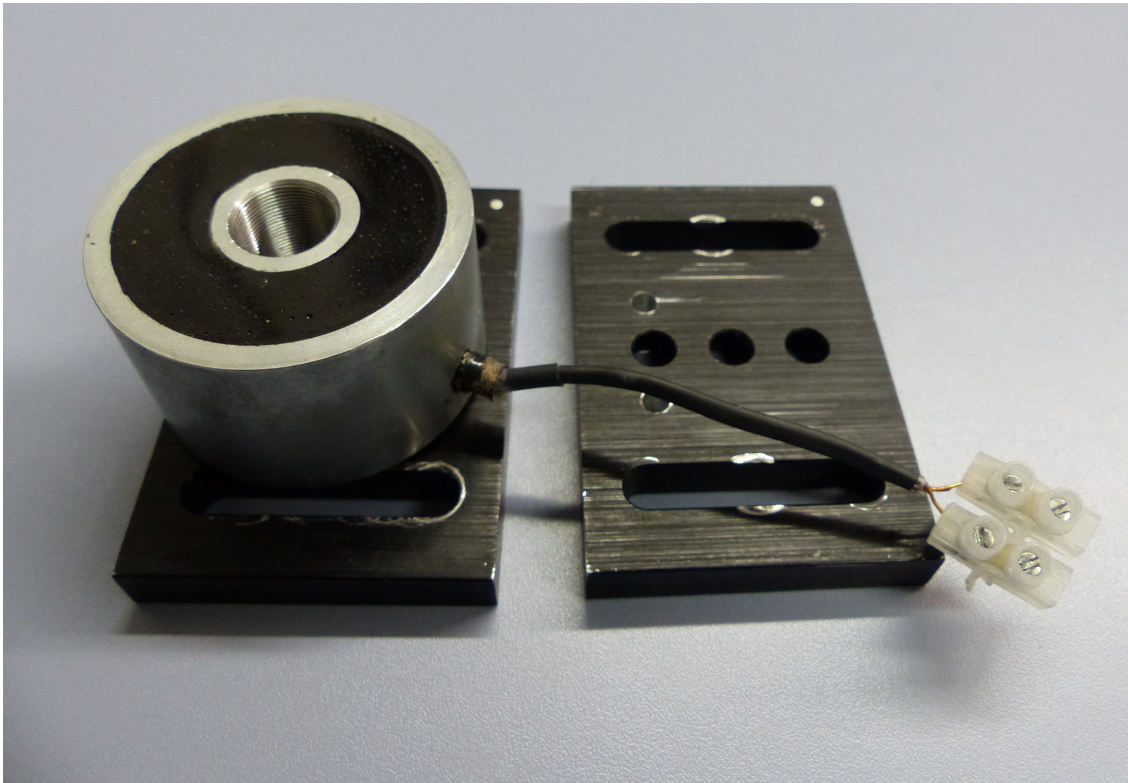


Abbildung 4.1: Selbstgebauter Magnet mit Bohrung für die Optik des OCT-Messkopfes

## 4.1 Aufbau der Impulsschaltung

Nach einer Recherche zum Betrieb von induktiven Lasten [8][17] wurde folgende Schaltung für den Impulsbetrieb entworfen .

Abbildung 4.2 stellt den schematischen Aufbau der Impulsschaltung dar. Die wichtigsten Bauteile sind dabei der Kondensator, welcher eine gemessene Kapazität von rund  $4200 \mu F$  besitzt und die Spule, welche hier durch eine Induktivität 'Spule-L' mit  $10 \text{ mH}$  und einem ohmschen Widerstand 'Spule-R' mit  $3,5 \Omega$  dargestellt ist. Der Bipolartransistor mit isoliertem Gate (IGBT) IXGH48N60C3 bildet einen Schalter [4], der durch den Frequenzgenerator angesteuert wird. Der in der Zeichnung enthaltene Bipolartransistor ist der einzige, der in dieser Form in dem Simulationsprogramm für elektrische Bauelemente PSpice 9.1 Student zur Verfügung stand, verhält sich aber genauso wie der real verwendete. Durch die Isolation des Gate-Anschlusses des IGBT, lassen sich sehr hohe Ströme mit einer Schaltspannung von rund  $15 \text{ V}$  schnell und verlustarm schalten. Die Spannungsquelle lädt in gesperrtem Zustand des IGBTs den Kondensator auf die gewünschte Spannung auf. Im durchgeschalteten Zustand des IGBTs entlädt sich der Kondensator über die Spule und den Messwiderstand. Mit dem Messwiderstand wird der Stromfluss und damit die Funktionstüchtigkeit der Schaltung überwacht. Die

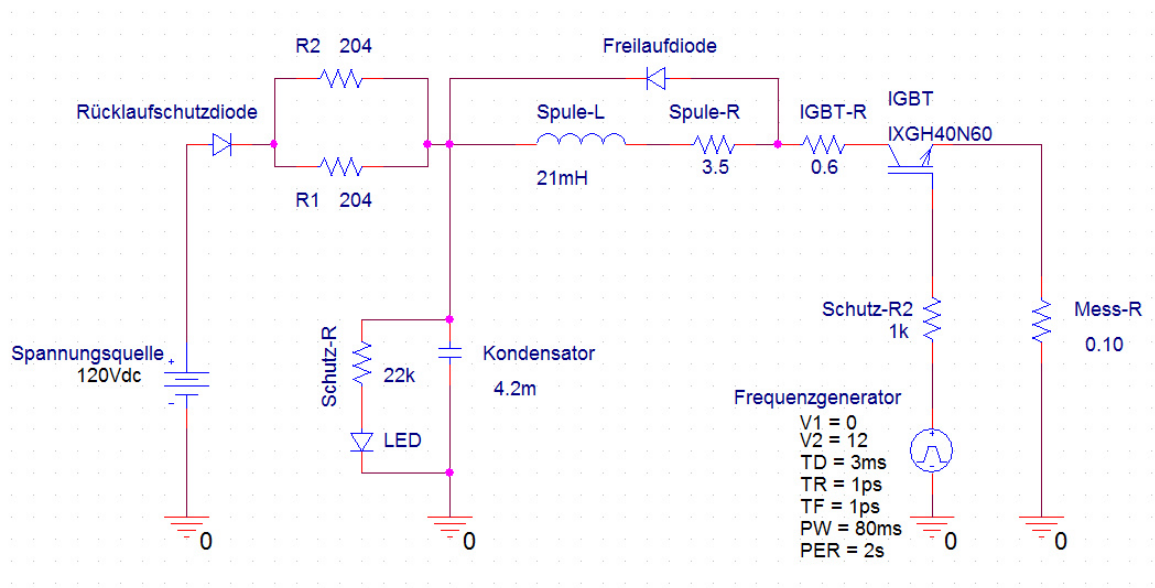


Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau der Impulsschaltung, erstellt mit PSpice. Frequenzgenerator: TD: Timedelay; PW: Impulslänge; Per: Periodendauer; V1, V2: Spannungen zwischen denen der Frequenzgenerator schaltet in Volt; TF, TR: Flankenzeiten, die hier so klein wie möglich gesetzt werden, um möglichst ideale Simulation zu erhalten.

Rücklaufschutzdiode verhindert, dass sich der Kondensator über die Spannungsquelle entlädt, falls man diese abstellt. Um zu verhindern, dass der Kondensator auch nach Abstellen der Spannungsquelle längere Zeit aufgeladen bleibt und somit eine Gefahrenquelle darstellt, wurde ein 22 k $\Omega$  großer Ableitwiderstand (Schutz-R) eingebaut. Mit der Kapazität und dem Wert des Widerstands ergibt sich nach Gleichung (2.25) eine Entladezeit von rund acht Minuten. Der IGBT verhindert zudem noch, dass es zum Schwingen kommt, da die Anordnung der Spule und des Kondensators der eines Schwingkreises entspricht. Auch der IGBT wirkt als Diode und verhindert einen Rückfluss des Stromes. Um den Aufladestrom nicht allzu groß werden zu lassen, wurden die beiden Leistungswiderstände R1 und R2 mit 200  $\Omega$  so gewählt, dass die Leistung, die über jedem Widerstand abfällt, 60 W nicht übersteigt und der Ladestrom trotzdem groß genug ist, damit der Kondensator in jeder Periode, welche rund zwei Sekunden beträgt, wieder voll aufgeladen werden kann.

Die Impulsschaltung wurde zur Sicherung des Bipolartransistors mit einer Freilaufdiode ausgestattet. Die Diode bewirkt eine Reduzierung der Spannungsspitze, die durch das Ausschalten des Stromes aufgrund der Selbstinduktion der Spule entsteht und über dem IGBT abfällt. Da diese Spannungsspitze aufgrund der hohen Feldenergie sehr groß ist (laut Simulation kann diese 600 V betragen), kann es beim Abschaltvorgang ohne Freilaufdiode zu einer Zerstörung des IGBT kommen. Die ausgewählten Bauteile genügen den Leistungsanforderungen (120 V, 30 A, 60 W) und besitzen nach Möglichkeit noch einen Sicherheitsfaktor.

Der Frequenzgenerator wird in der realen Messung über das Messprogramm getriggert und generiert nicht mit den angegebenen Werten den Puls für den IGBT. Das hat den Grund, dass für die Doppler-Messung eine Synchronität der Dauer des Magnetfeldes mit der Dauer des B-Scans empfehlenswert ist, um eine Phasenverschiebung darstellen zu können. Die in der Abbildung angegebenen Werte sind für die Simulation so gewählt, dass sie ungefähr den Charakteristiken der Messung entsprechen (Pulslänge und Flankenzeiten des Frequenzgenerators können als ideal angenommen werden). Die Kapazität des Kondensators wurde so festgelegt, dass das Magnetfeld nach 20 *ms* noch mindestens die Hälfte der maximalen Feldstärke besitzt. Dazu wurde sie auf den Widerstand der Spule abgestimmt.

Zur Konstruktion und Simulation der Schaltung wurde das Programm PSpice 9.1 student version genutzt, welches zwar nicht alle Bauelemente, wie sie in der realen Umsetzung genutzt wurden, zur Verfügung hatte, aber zumindest ähnliche. Die Leitungswiderstände, Innenwiderstände und andere parasitäre Einflüsse der realen Bauelemente wurden in der Simulation nicht alle berücksichtigt, aber einige leicht nachmessbare Unterschiede zwischen realem und theoretischem Wert wurden ausgeglichen. Dies betrifft die Werte der Ladewiderstände, die Kapazität des Kondensators und den Innenwiderstand des IGBT in der Simulation und den realen IGBT (IGBT-R).

## 4.2 Kompletter Aufbau zum Betrieb der Schaltung

Um die Schaltung benutzen zu können, wurden verschiedene Geräte zur Strom- und Spannungsversorgung, Transistorsteuerung und für die Überwachung eingesetzt. Abbildung 4.3 zeigt den Aufbau, welcher dafür entstand.

## 4.3 Bestimmung der Induktivität und der magnetischen Flussdichte der Spule

Da in dieser Arbeit ein Elektromagnet verwendet wurde, welcher nicht die für Gleichung 2.3.1 benötigten Bedingungen erfüllt, ist die Bestimmung der Induktivität rechnerisch äußerst kompliziert. Um eine Abschätzung zu erhalten wurden Messungen der Induktivität gemacht. Dabei stellte sich eine Frequenzabhängigkeit heraus. Zur Bestimmung der Induktivität wurde mit dem Frequenzgenerator und einer Verstärkerendstufe ein Wechselstrom erzeugt bei einer festen Wechselspannung und einer Frequenz, die von 10 *Hz* bis 1000 *Hz* in unterschiedlichen Schritten eingestellt wurde. Für jede Frequenz wurde der Strom gemessen und über Umstellen und Einsetzen der Gleichungen (2.19) und (2.18) wurde die Induktivität anhand des komplexen Widerstandes bestimmt.

Die magnetische Flussdichte wurde mittels eines Teslameters gemessen, welches in

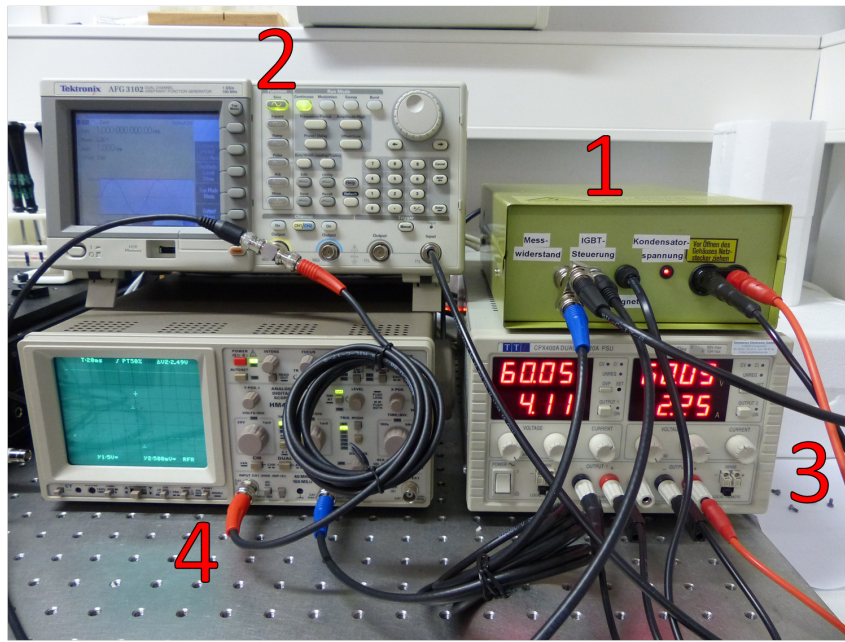


Abbildung 4.3: Aufbau zur Bedienung der Schaltung mit den Komponenten 1 Impulsschaltung; 2 Spannungsversorgung; 3 Frequenzgenerator; 4 Oszilloskop

verschiedenen Abständen über der Spule, die Messdaten erfasst hat. Es wurde zu jedem Abstand der Peak eines Pulses bei verschiedenen Ladespannungen des Kondensators bestimmt. Dies diente dazu den optimalen Abstand zur Platzierung der Probe über dem Magneten zu finden (den Abstand mit dem größten Flussdichtegradienten).



## 5 Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen vor allem die Ergebnisse der simulierten Schaltung und der Messung der realen Schaltung gegenübergestellt werden, da der Großteil der Dimensionierung anhand der Simulation vorgenommen beziehungsweise abgestimmt wurde.

### 5.1 Simulation

Zum besseren Vergleich wurde der Impuls in der Simulation 3 *ms* nach Beginn der Simulation gestartet, da die Messwerte ebenfalls so aufgenommen wurden, dass der Impuls nach 3 *ms* erfolgte.

Mit der Schaltung in Abbildung 4.2 wurden folgende Simulationen für die Spannung über dem Kondensator und die Stromstärke durch den Messwiderstand erstellt.

Die Ladespannung, mit welcher der Kondensator aufgeladen wird, ist die einzige einstellbare Größe um die maximale Stärke des Stromimpulses zu

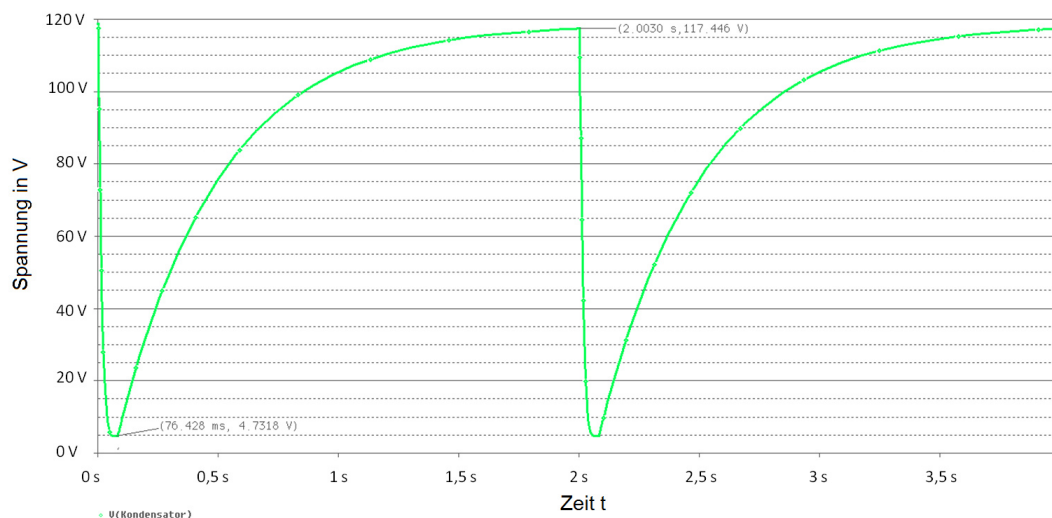


Abbildung 5.1: Simulation der Spannung über dem Kondensator; bedingt durch das Programm ist der Kondensator um Start der Simulation bereits voll aufgeladen. Dargestellt sind zwei Entladungen und zwei vollständige Wiederaufladungen.

Der Kondensator lädt sich bis auf einen Wert von 117,4 V Spannung auf und entlädt sich bis zu einem Minimum von 4,7 V. Nach der ersten Entladung benötigt der Kondensator ca. 1,9 s, um wieder seinen maximalen Spannungswert zu erreichen.

Die Stromstärke erreicht nach 11 *ms* ihren höchsten Wert mit 20,6 A. Im weiteren Verlauf



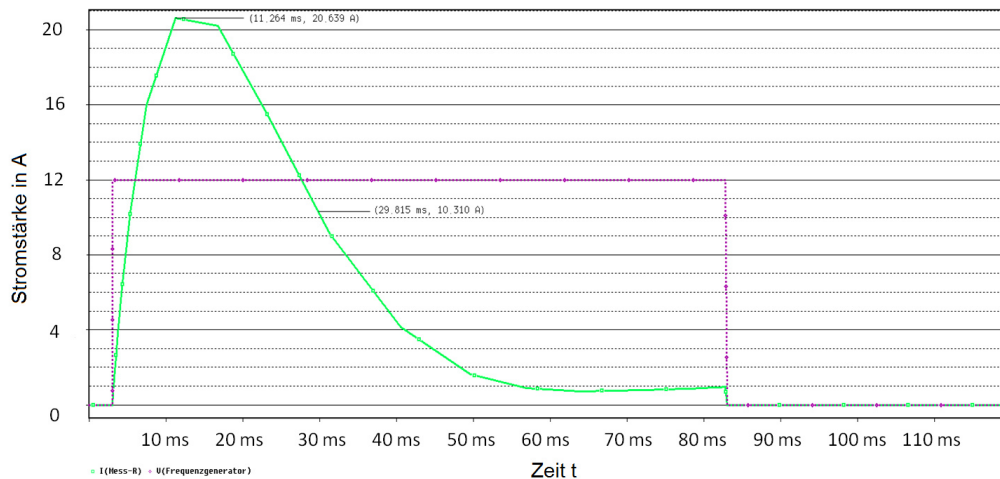


Abbildung 5.2: Simulation des Stromes durch den Messwiderstand bei einer Spuleninduktivität von  $21\text{ mH}$ , während einer Entladung des Kondensators. Dazu dargestellt ist die Spannung des Frequenzgenerators, mit dem der Transistor gesteuert wird.

sinkt die Stromstärke auf etwa  $1\text{ A}$ . Der Stromfluss endet gleichzeitig mit dem Enden des Pulses.

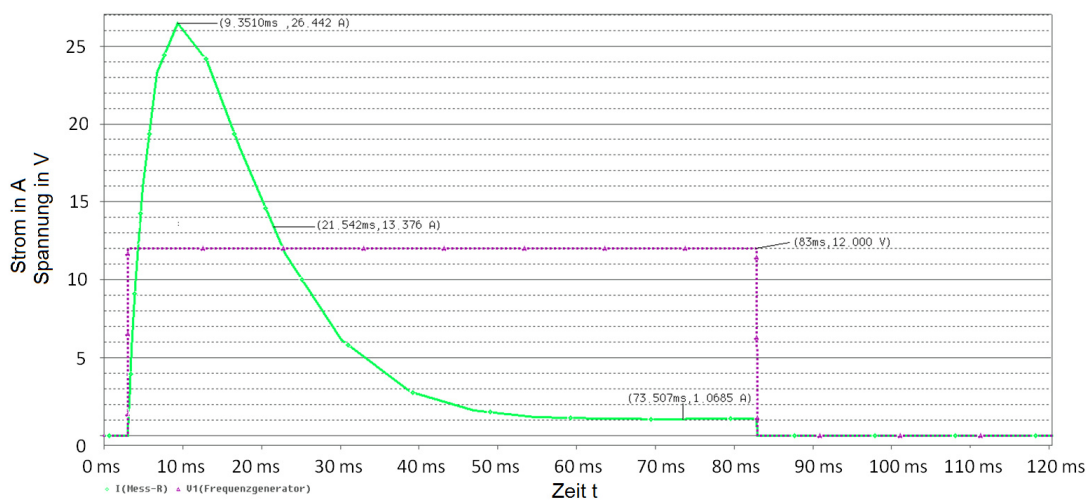


Abbildung 5.3: Simulation des Stromes durch den Messwiderstand bei einer Spuleninduktivität von  $10\text{ mH}$ , während einer Entladung des Kondensators. Dazu dargestellt ist die Spannung des Frequenzgenerators, mit dem der Transistor gesteuert wird.

Abbildung 5.3 zeigt die Simulation des Stromes durch den Messwiderstand mit einer Spuleninduktivität von  $10\text{ mH}$ . Der Peak wird nach circa  $9\text{ ms}$  erreicht und beträgt  $26\text{ A}$ . Nach  $60\text{ ms}$  ist die Stromstärke auf einen konstanten Wert von ungefähr  $1\text{ A}$  abgefallen. Nach  $83\text{ ms}$  schließt der IGBT und der Strom fällt auf  $0\text{ A}$  ab.



## 5.2 Aufgebaute Impulsschaltung

Abbildung 5.4 zeigt die reale Umsetzung der Schaltung mit den verwendeten Leistungskomponenten. Sie wurde per Hand aufgebaut, getestet und analysiert und anschließend in ein geeignetes Gehäuse integriert.

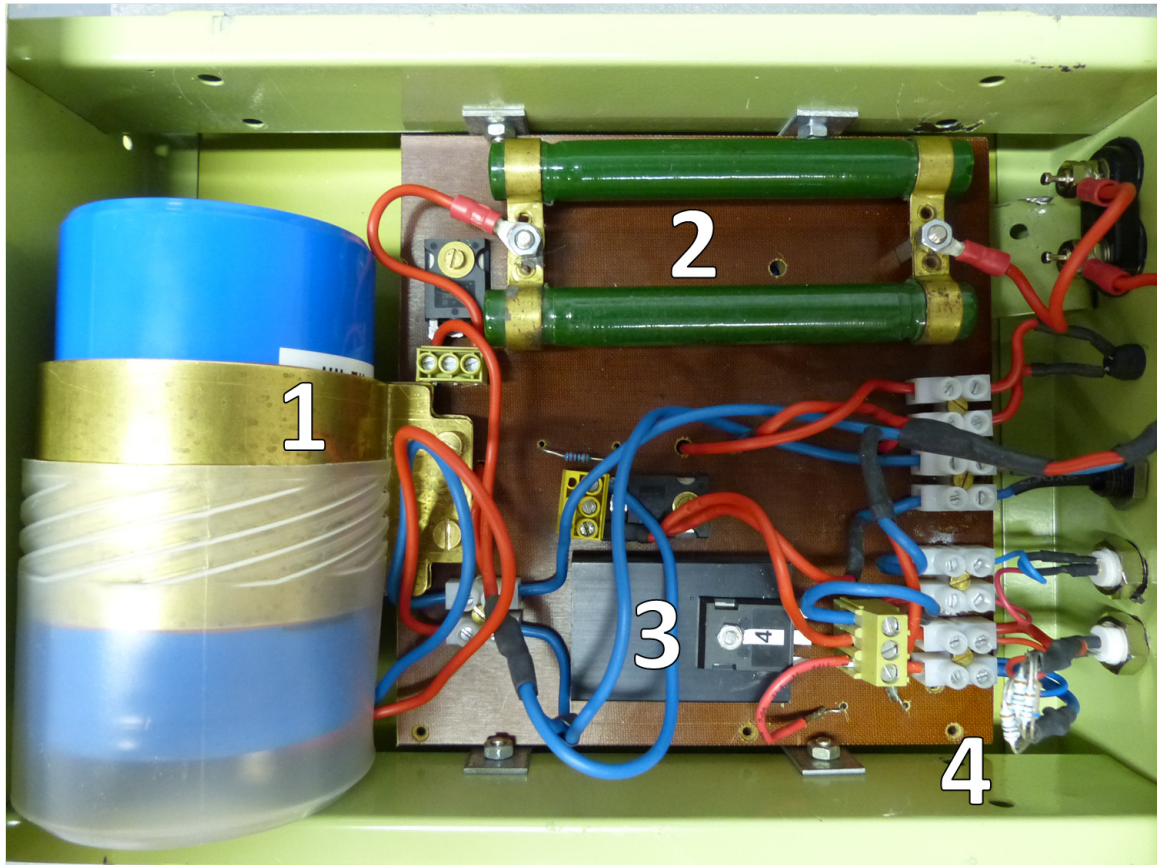


Abbildung 5.4: Aufbau der Impulsschaltung. Zusätzlich angebracht sind Ausgänge zur Messung des Stromes und der Überwachung des Kondensators. 1 Kondensator; 2 Lade-  
widerstände; 3 Bipolartransistor mit Isoliertem Gate; 4 Messwiderstand

Mit dieser Schaltung wurden folgende Werte experimentell ermittelt:

Gemessen wurde der Strom durch den Spannungsabfall über dem Messwiderstand. Dieser erreicht nach circa  $8\text{ ms}$  seinen Spitzenwert von  $26\text{ A}$ . Innerhalb der nächsten  $12\text{ ms}$  fällt der Strom auf die Hälfte ab und von da weiter, bis er nach  $83\text{ ms}$  mit dem Schließen des IGBT mit  $0\text{ A}$  zum Erliegen kommt.

Weiterhin wurde eine Messreihe zur Untersuchung der Frequenzabhängigkeit der Induktivität der Spule erstellt (Abbildung 5.6). Dazu wurde mit einem Frequenzgenerator und einem Verstärker ein Wechselstrom bei einer konstanten Spannung und einer variablen Frequenz durch die Spule geschickt. Der Strom wurde mithilfe eines Multimeters für die jeweiligen Frequenzen gemessen. Dies lieferte eine Abhängigkeit des komplexen Widerstandes der Spule von der Frequenz des Wechselstroms.

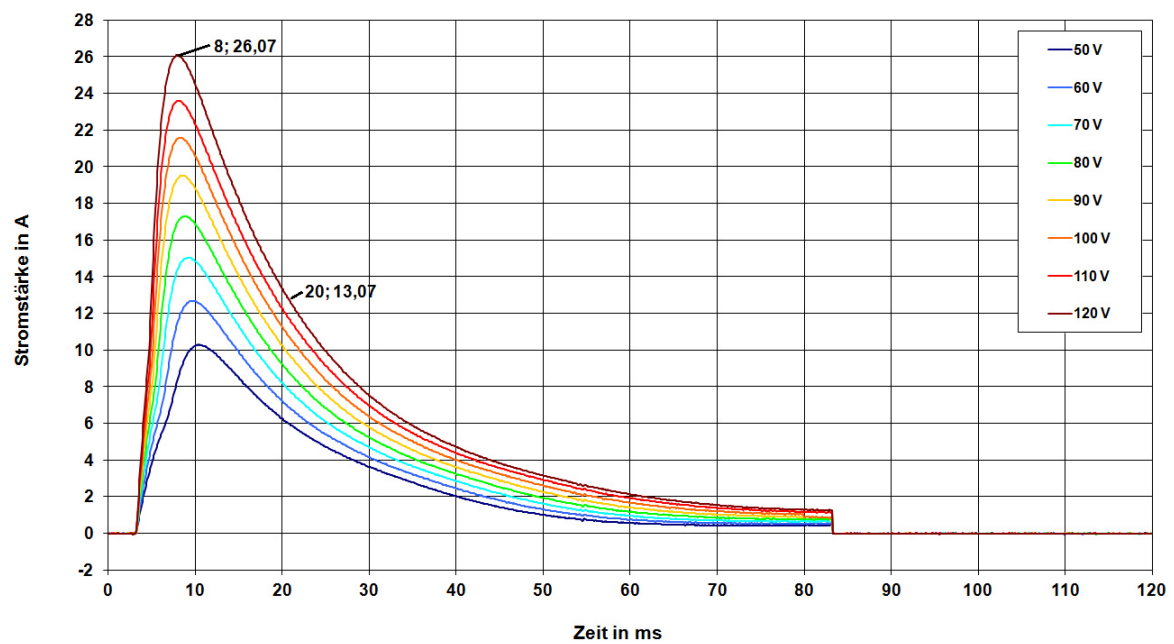


Abbildung 5.5: Messung des Stromes durch den Messwiderstand bei verschiedenen Ladespannungen des Kondensators

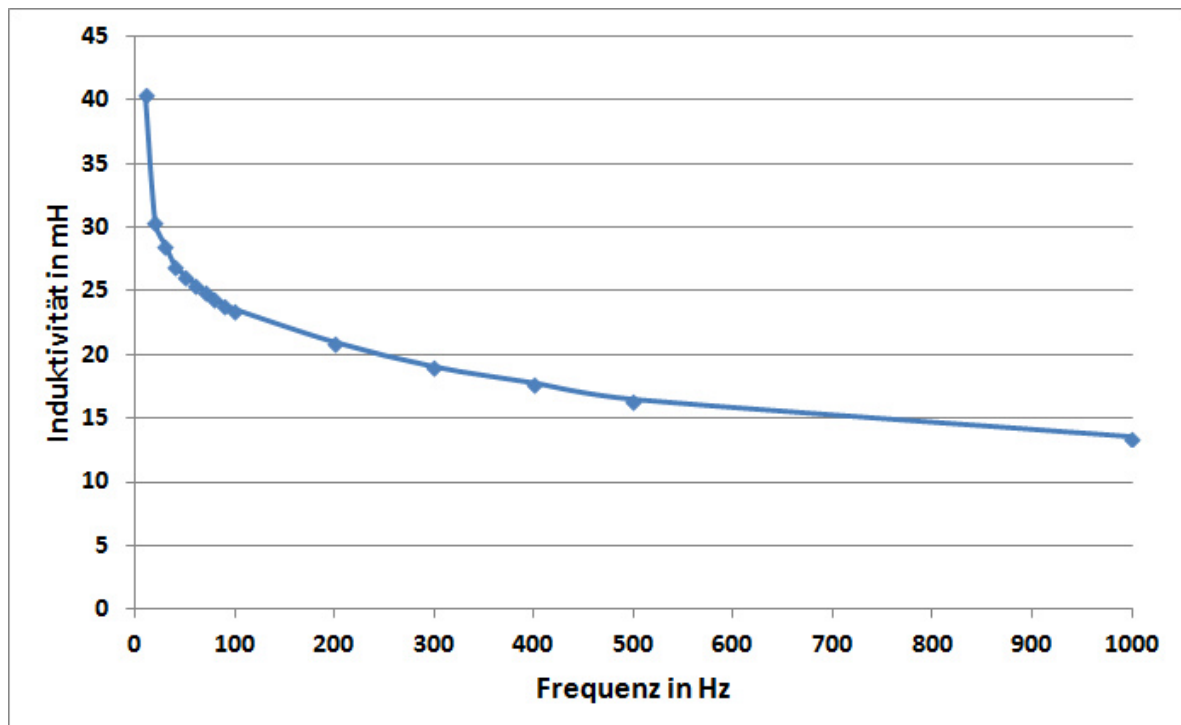


Abbildung 5.6: Darstellung der Induktivität in Abhängigkeit der Frequenz eines Wechselstromes mit der Spannungsamplitude von 6 V.

Zur Bestimmung der magnetischen Flussdichte des Elektromagneten wurden zwei Messreihen aufgenommen. Die erste Messung erfolgte bei 60 V Ladespannung und die zweite bei 120 V. Es ergaben sich folgende Daten.

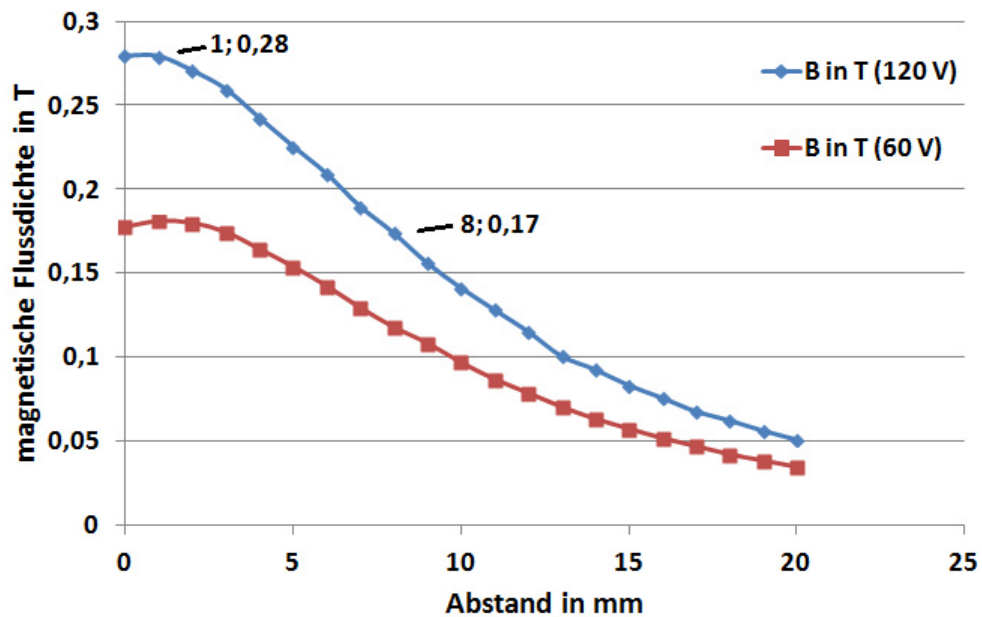


Abbildung 5.7: Die magnetische Flussdichte bei den Ladespannungen 60 V und 120 V in Abhängigkeit des Abstandes der Messsonde axial vom Gewinde des Magneten.

### 5.3 Doppler-OCT-Aufnahmen eines Phantoms

Die vier Einzelbilder aus Abbildung 5.8 zeigen jeweils einen B-Scan eines Bereiches auf einem Target. Dieses Target besteht aus einer Folie, auf der eine Schicht magnetischer Nanopartikel aufgebracht ist, welche mit einem Deckgläschen bedeckt ist. Der Laser verläuft während eines B-Scans von links nach rechts, wodurch auch innerhalb der Abbildungen ein Zeitverlauf existiert. Dieser Zeitverlauf ist durch die Spannungskurve in den Bildern nachvollziehbar. Diese Spannungskurve wurde über dem Messwiderstand ( $R=0,1\ \Omega$ ) gemessen. Dabei entsprechen 100 Pixel in der Graphik einer Spannung von 1 V. Jedes Bild wurde in 37,33 ms aufgenommen.

Das erste Bild ist das Referenzbild welches das Target vor einem Stromimpuls darstellt. In dem zweiten Bild sieht man eine Verfärbung, welche eine Bewegung der magnetischen Nanopartikel zeigt.

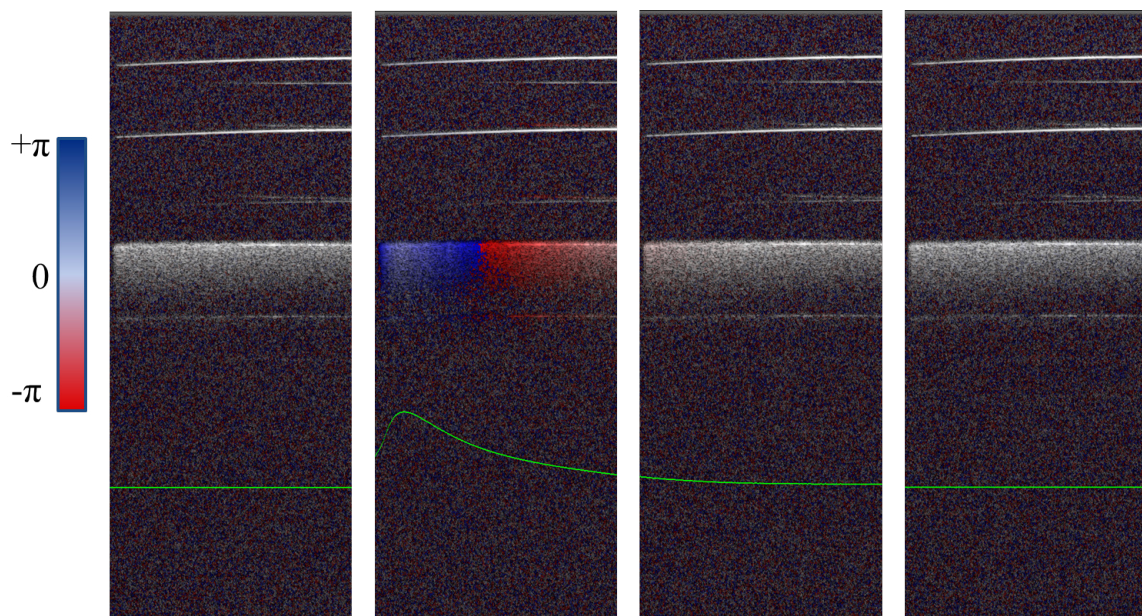


Abbildung 5.8: vier B-Scans mit Dopplerverschiebung einer Schicht magnetischer Nanopartikel zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Zu sehen sind die beiden Grenzflächen eines Deckgläsches (1), die Schicht der magnetischen Nanopartikel (2) und das Spannungssignal über dem Messwiderstand (3).



## 6 Diskussion

Das Hauptaugenmerk dieses Kapitels liegt auf den Simulations- und Messwerten der aufgebauten Schaltung. Beim Vergleich der Simulation mit den Messwerten, fällt auf, dass die Induktivität, die gemessen wurde, nicht mit der Induktivität übereinstimmt, welche die besten Simulationswerte gebracht hat. Auch der Vergleich zwischen den gemessenen magnetischen Flussdichten bei 60 V und 120 V, entspricht nicht den Erwartungen. Eine mögliche Erklärung dafür, dass die Flussdichte bei der doppelten Spannung und damit doppelter Stromstärke nicht die doppelte magnetische Flussdichte liefert, könnte sein, dass die magnetische Sättigung des Spulenkernmaterials erreicht ist und die Spule kein lineares Verhalten mehr zwischen durchflossenem Strom und erzeugtem Magnetfeld zeigt. Ein weiterer Einfluss könnte durch parasitäre Wicklungskapazitäten der Spule entstehen.

Besonders das Verhalten der Induktivität des Magneten stellte dabei ein Aspekt dar, der die Komplexität der Spule veranschaulicht. Wie in Abbildung 5.6 zu sehen, ist die Induktivität bei dem verwendeten Elektromagneten stark frequenzabhängig. Da es sich bei dem erzeugten Stromverlauf nicht um einen Gleichstrom handelt, hat sein Verlauf Auswirkungen auf die Induktivität, welche wiederum Auswirkungen auf den weiteren Verlauf der Stromstärke ausübt. Dieser Zusammenhang ist insofern schwer zu erfassen, da der Verlauf der Induktivität während eines Pulses nicht messbar ist. Mit den Simulationen wurde versucht, eine möglichst genaue Reproduktion des Stromverlaufs der Messung zu erreichen. Dies gelang am besten mit der Induktivität  $L = 10 \text{ mH}$ . Bei diesem Wert erreichen Simulation und Messung annähernd den gleichen Spitzenwert und liegen dabei zeitlich nur eine Millisekunde auseinander. Diese 10 mH konnten aber bei keiner Frequenz nachgemessen werden. Daher wird vermutet, dass auch bei der Bestimmung der Induktivität das Erreichen der magnetischen Sättigung Auswirkungen auf die Ergebnisse hat.

Durch diese Nichtlinearität der magnetischen Flussdichte bezüglich des Stromes, der durch die Spule fließt, ist ebenfalls die Kraft auf die magnetischen Nanopartikel kleiner, als der Strom vermuten lässt. In der Bachelorarbeit von Theresa Werner [20], wurden mithilfe eines kombinierten Permanent-Elektromagneten Flussdichten  $|\vec{B}|$  von circa 100 mT bei einem Abstand von 8 mm erreicht. Der Gradient  $\nabla(|\vec{B}|)$  zwischen den 8 mm und 7 mm entspricht dabei  $9 \frac{T}{m}$  (diese beiden Abstände entsprechen im späteren OCT-Aufbau dem Abstand zwischen Magnet und Probe). Mit den in dieser Bachelorarbeit erzielten Messwerten wurde eine magnetische Flussdichte von 170 mT erreicht und ein Gradient von  $16 \frac{T}{m}$ . Ebenfalls in der Arbeit von Frau Werner wurde eine Gleichung für die Kraft auf die Nanopartikel angegeben.

$$\vec{F} = \frac{V_{MNP} \cdot (\chi_{medium} - \chi_{MNP}) \cdot |\vec{B}| \cdot \nabla(|\vec{B}|)}{2 \cdot \mu_0} \quad (6.1)$$

Das bedeutet für die Kraftwirkung auf die magnetischen Nanopartikel, dass die Kraft, die auf die magnetischen Nanopartikel wirkte auf das dreifache gesteigert wurde ( $V_{MNP}$  ist das Volumen eines Nanopartikels,  $\chi$  ist die magnetische Suszeptibilität eines Stoffes).

Die farbkodierte Dopplerverschiebung bei dem Modellversuch der Doppler-OCT mit der Schicht Nanopartikel ist abhängig von der Stärke beziehungsweise der Richtung der Ablenkung. Da nur die Phasenverschiebung als Indikator für eine Bewegung genutzt wird, sind nur Auslenkungen genau, die nicht Vielfache von  $\frac{\lambda}{2}$  sind, da diese eine Phasendifferenz von Null beziehungsweise Vielfache von  $2\pi$  hervorrufen würden. Prinzipiell beschreiben die unterschiedlichen Farben unterschiedliche Richtungen der Bewegung. Da sich die Phasenverschiebung periodisch wiederholt, führt das bei ausreichend großen Auslenkungen zur gleichen Phaseninformation, die bei einer kleinen Auslenkung in die entgegengesetzte Richtung auftreten würde. Um die Phasenverschiebung richtig als Bewegung zu interpretieren sollte man den zweiten B-Scan von rechts nach links betrachten. Eine Rotfärbung zeigt eine Verschiebung der Nanopartikel in Richtung des Magneten. Bei dem Sprung von Rot auf Blau wird der Bereich überschritten, der eine Verschiebung genau charakterisiert. Das schwächer werdende Blau zeigt eine stärker werdende Verschiebung, die bei ihren maximal Wert zeitlich an der gleichen Stelle wie der Stromimpuls. Da in der magnetomotiven OCT primär nur eine Detektion der Bewegung und keine Quantisierung der Geschwindigkeit erfolgen soll, wurde dieses Phänomen jedoch nicht weiter berücksichtigt.

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die aufgebaute Schaltung kann benutzt werden um die Nanopartikel mit der magnetotactiven OCT darstellen zu können. Die durch die Schaltung erzeugten Stromstärken generieren Magnetfelder, die ein deutliches Dopplersignal durch die magnetischen Partikel hervorbringen. Im Vergleich zu Vorarbeiten (Bachelorarbeit Theresa Werner) konnte die maximale Stromstärke, durch den Magneten, um das siebenfache erhöht werden. Dies hatte zwar nur eine dreifache magnetische Flussdichte zur Folge, was aber dennoch eine deutliche Verbesserung ist.

Die Schaltung wurde mit den notwendigen Sicherheitswarnhinweisen gekennzeichnet und benutzerfreundlich beschriftet. Alle Bauteile sind so ausgelegt, dass sie bei den derzeit möglichen Belastungen nicht an ihre Grenzen stoßen und somit prinzipiell kein Unfallrisiko darstellen. Falls andere Bedingungen an die Schaltung gestellt werden, unter denen man die jetzigen Bauteile nicht verwenden könnte, können sie einzeln, leicht und schnell ausgetauscht werden. Dies gilt selbstverständlich auch für defekte Komponenten.

Der nächste Schritt wäre die Erprobung der Schaltung mit der Doppler-OCT an Zellkulturen. Zwar ist die Schaltung mit der jetzigen Wiederholrate von  $0,5 \text{ Hz}$  der Pulse noch eher wenig geeignet für die schnelle in vivo Bildgebung, allerdings könnte eine veränderte Form der Aufladung des Kondensators zu wesentlich kürzeren Ladezeiten führen und die Schaltung somit ohne große Veränderungen für invivo Messungen verwendbar machen. Eine Möglichkeit wäre die Verwendung eines Schaltnetzteils. Auch wäre noch zu untersuchen, wie sich die Induktivität während eines Pulses verhält, um den Magnet diesbezüglich genauer charakterisieren zu können.





# Literaturverzeichnis

- [1] Das Internationale Einheitensystem (SI). Deutsche Übersetzung der BIPM-Broschüre "Le Système international d'unités/The International System of Units (8e edition, 2006)". In: PTB-Mitteilungen. 117, Nr. 2, 2007 (übersetzt von Cecile Charvieux), S. 156
- [2] Echternkamp, K. (2011). (G. A. Göttingen, Herausgeber) Abgerufen am 24. April 2013 von <http://lp.uni-goettingen.de/get/text/6521>
- [3] [http://de.wikipedia.org/wiki/Spule\\_\(Elektrotechnik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Spule_(Elektrotechnik)) (17.9.2013)
- [4] Handbuch der Elektronik. Franzis-Verlag, München 1979
- [5] Der Brockhaus, Naturwissenschaft und Technik. Wissen Media Verlag 2003
- [6] [http://de.wikipedia.org/wiki/James\\_Clerk\\_Maxwell#Elektromagnetismus](http://de.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell#Elektromagnetismus) (4.9.2013)
- [7] [http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrischer\\_Widerstand#Einflusseffekte](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrischer_Widerstand#Einflusseffekte) (3.9.2013)
- [8] Jasung Koo et al.: Pulsed magneto-motive optical coherence tomography for remote cellular imaging. Optics Letters, South Korea 2012
- [9] <http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrizität> (11.9.2013)
- [10] <http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetismus> (10.9.2013)
- [11] <http://de.wikipedia.org/wiki/Maxwell-Gleichungen#.C3.9Cbersicht> (11.9.2013)
- [12] <http://home.arcor.de/hannesegger/StromdurchflossenerLeiterundMagnetfeld.html> (12.9.2013)
- [13] <http://de.wikipedia.org/wiki/Ferromagnetismus> (6.9.2013)
- [14] <http://de.wikipedia.org/wiki/Diamagnetismus> (6.9.2013)
- [15] <http://de.wikipedia.org/wiki/Paramagnetismus> (6.9.2013)
- [16] [http://de.wikipedia.org/wiki/Komplexe\\_Wechselstromrechnung](http://de.wikipedia.org/wiki/Komplexe_Wechselstromrechnung) (20.9.2013)
- [17] <http://www.coilgun.info/mark2/schematic.htm> (18.6.2013)

- [18] [http://de.wikipedia.org/wiki/Kondensator\\_\(Elektrotechnik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Kondensator_(Elektrotechnik)) (20.9.2013)
- [19] [http://m.schuelerlexikon.de/mobile\\_physik/Induktivitaet.htm](http://m.schuelerlexikon.de/mobile_physik/Induktivitaet.htm) (18.9.2013)
- [20] Theresa Werner: Bachelorarbeit Dimensionierung und Erzeugung magnetischer Wechselfelder für die magnetomotive Optische Kohärenztomographie Deutschland 2013
- [21] <http://www.izfp-d.fraunhofer.de/assets/downloads/oct.pdf>
- [22] Norbert Koop *etal.*: Optische Kohärenztomographie der Kornea und des vorderen Augenabschnitts. Der Ophthalmologe, Deutschland 1997
- [23] Kai Winkler: Praktikumsbeleg Aufbau einer Kühlung für einen elektrisch betriebenen Magnetfeldgenerator zum Einsatz in der magnetomotiven Optischen Kohärenztomografie, Deutschland 2013

## **8 Anhang**

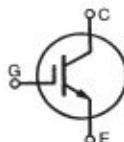
# Liste der verwendeten Bauteile

Bauteil	Artikelbeschreibung	Hersteller	Angegebener Wert	Gemessene Wert
Kondensator	Aluminium Capacitors Power High Ripple Screw terminals	Vishay BCcomponents	4700 $\mu$ F	4200 $\mu$ F
Ladewiderstände	Leistungswiderstände 60 W	-	200 $\Omega$	204 $\Omega$
IGBT	IGXH48N60C3	IXYS Corporation	600 V, 48 A	-
Diode	QuietIR Series 40EPF02	International IR Rectifier	200 V, 40 A	-
Spulendraht	Kupferlackdraht CUL	Block	-	-

## GenX3™ 600V IGBT

High Speed PT IGBTs for  
40-100kHz switching

**IXGA48N60C3**  
**IXGH48N60C3**  
**IXGP48N60C3**

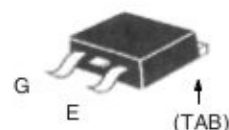


$V_{CES} = 600V$   
 $I_{C110} = 48A$   
 $V_{CE(sat)} \leq 2.5V$   
 $t_{fi(typ)} = 38ns$

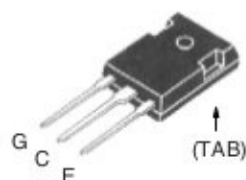
Symbol	Test Conditions	Maximum Ratings	
$V_{CES}$	$T_C = 25^\circ C$ to $150^\circ C$	600	V
$V_{CGR}$	$T_J = 25^\circ C$ to $150^\circ C$ , $R_{GE} = 1M\Omega$	600	V
$V_{GES}$	Continuous	$\pm 20$	V
$V_{GEM}$	Transient	$\pm 30$	V
$I_{C25}$	$T_C = 25^\circ C$ ( Limited by Leads)	75	A
$I_{C110}$	$T_C = 110^\circ C$	48	A
$I_{CM}$	$T_C = 25^\circ C$ , 1ms	250	A
$I_A$	$T_C = 25^\circ C$	30	A
$E_{AS}$	$T_C = 25^\circ C$	300	mJ
<b>SSOA</b> <b>(RBSOA)</b>	$V_{GE} = 15V$ , $T_{VJ} = 125^\circ C$ , $R_G = 3\Omega$ Clamped Inductive Load @ $\leq 600V$	$I_{CM} = 100$	A
$P_C$	$T_C = 25^\circ C$	300	W
$T_J$		-55 ... +150	$^\circ C$
$T_{JM}$		150	$^\circ C$
$T_{stg}$		-55 ... +150	$^\circ C$
$T_L$	1.6mm (0.062 in.) from Case for 10s	300	$^\circ C$
$T_{SOLD}$	Plastic Body for 10 Seconds	260	$^\circ C$
$M_d$	Mounting Torque (TO-247&TO-220)	1.13/10	Nm/lb.in.
<b>Weight</b>	TO-247	6.0	g
	TO-220	3.0	g
	TO-263	2.5	g

Symbol	Test Conditions ( $T_J = 25^\circ C$ Unless Otherwise Specified)	Characteristic Values		
		Min.	Typ.	Max.
$BV_{CES}$	$I_C = 250\mu A$ , $V_{GE} = 0V$	600		V
$V_{GE(th)}$	$I_C = 250\mu A$ , $V_{CE} = V_{GE}$	3.0		5.5 V
$I_{CES}$	$V_{CE} = V_{CES}$			25 $\mu A$
	$V_{GE} = 0V$ $T_J = 125^\circ C$			250 $\mu A$
$I_{GES}$	$V_{CE} = 0V$ , $V_{GE} = \pm 20V$			$\pm 100$ nA
$V_{CE(sat)}$	$I_C = 30A$ , $V_{GE} = 15V$ , Note 1 $T_J = 125^\circ C$	2.3	2.5	V
		1.8		V

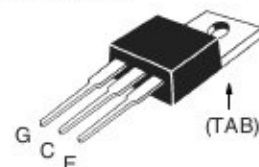
TO-263 (IXGA)



TO-247 (IXGH)



TO-220 (IXGP)



G = Gate      C = Collector  
E = Emitter    TAB = Collector

### Features

- Optimized for Low Switching Losses
- Square RBSOA
- Avalanche Rated
- Fast Switching
- International Standard Packages

### Advantages

- High Power Density
- Low Gate Drive Requirement

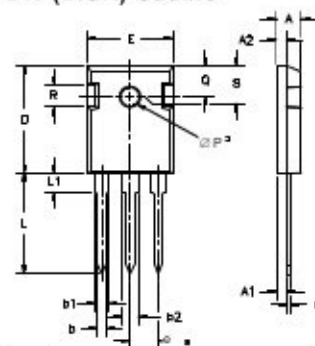
### Applications

- High Frequency Power Inverters
- UPS
- Motor Drives
- SMPS
- PFC Circuits
- Battery Chargers
- Welding Machines
- Lamp Ballasts

Symbol	Test Conditions	Characteristic Values		
$(T_J = 25^\circ\text{C}$ Unless Otherwise Specified)		Min.	Typ.	Max.
$g_{fs}$	$I_C = 30\text{A}$ , $V_{CE} = 10\text{V}$ , Note 1	20	30	S
$C_{ies}$	$V_{CE} = 25\text{V}$ , $V_{GE} = 0\text{V}$ , $f = 1\text{MHz}$		1960	pF
$C_{oes}$			207	pF
$C_{res}$			66	pF
$Q_g$	$I_C = 30\text{A}$ , $V_{GE} = 15\text{V}$ , $V_{CE} = 0.5 \cdot V_{CES}$		77	nC
$Q_{ge}$			16	nC
$Q_{gc}$			32	nC
$t_{d(on)}$	Inductive Load, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $I_C = 30\text{A}$ , $V_{GE} = 15\text{V}$ $V_{CE} = 400\text{V}$ , $R_G = 3\Omega$		19	ns
$t_{ri}$			26	ns
$E_{on}$			0.41	mJ
$t_{d(off)}$			60	ns
$t_{fi}$			38	ns
$E_{off}$			0.23	mJ
$t_{d(on)}$	Inductive Load, $T_J = 125^\circ\text{C}$ $I_C = 30\text{A}$ , $V_{GE} = 15\text{V}$ $V_{CE} = 400\text{V}$ , $R_G = 3\Omega$		19	ns
$t_{ri}$			26	ns
$E_{on}$			0.65	mJ
$t_{d(off)}$			92	ns
$t_{fi}$			95	ns
$E_{off}$			0.57	mJ
$R_{thJC}$				0.42 $^\circ\text{C/W}$
$R_{thCS}$	(TO-247)		0.21	$^\circ\text{C/W}$
	(TO-220)		0.50	$^\circ\text{C/W}$

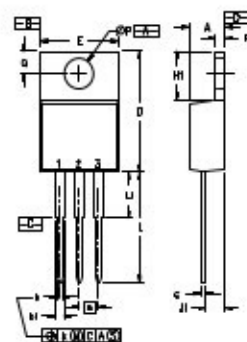
Note 1: Pulse Test,  $t \leq 300\mu\text{s}$ ; Duty Cycle,  $d \leq 2\%$ .

### TO-247 (IXGH) Outline



Dim.	Millimeter		Inches	
	Min.	Max.	Min.	Max.
A	4.7	5.3	.185	.209
A <sub>1</sub>	2.2	2.54	.087	.102
A <sub>2</sub>	2.2	2.6	.059	.098
b	1.0	1.4	.040	.055
b <sub>1</sub>	1.65	2.13	.065	.084
b <sub>2</sub>	2.87	3.12	.113	.123
C	.4	.8	.016	.031
D	20.80	21.46	.819	.845
E	15.75	16.26	.610	.640
e	5.20	5.72	0.205	0.225
L	19.81	20.32	.780	.800
L1		4.50		.177
ØP	3.55	3.65	.140	.144
Q	5.89	6.40	0.232	0.252
R	4.32	5.49	.170	.216
S	6.15	BSC	.242	BSC

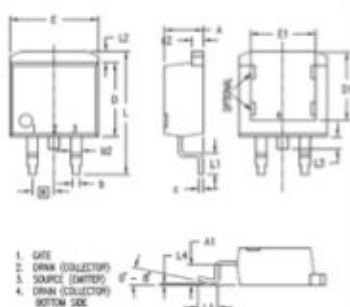
### TO-220 (IXGP) Outline



Pins: 1 - Gate 2 - Drain  
3 - Source 4 - Drain

SYM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	.170	.190	4.32	4.83
b	.025	.040	0.64	1.02
b <sub>1</sub>	.045	.065	1.15	1.65
c	.014	.022	0.35	0.56
D	.580	.630	14.73	16.00
E	.390	.420	9.91	10.66
e	.100 BSC		2.54 BSC	
F	.045	.055	1.14	1.40
H1	.230	.270	5.85	6.85
J1	.090	.110	2.29	2.79
k	0	.015	0	0.38
L	.500	.550	12.70	13.97
L1	.110	.230	2.79	5.84
ØP	.139	.161	3.53	4.08
Q	.100	.125	2.54	3.18

### TO-263 (IXGA) Outline



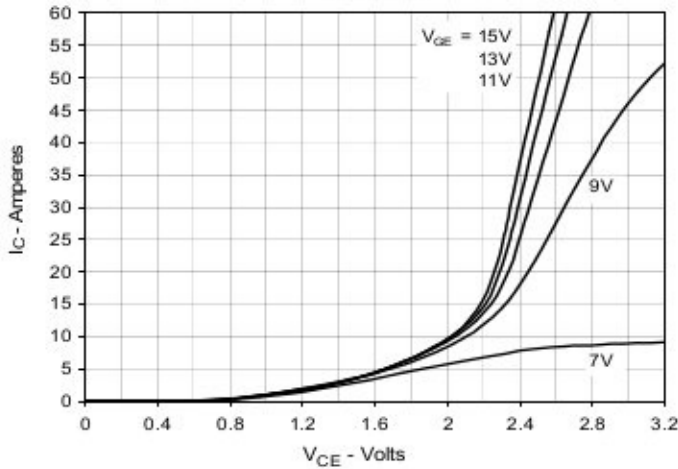
SYM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	.160	.190	4.06	4.83
A <sub>1</sub>	.080	.110	2.03	2.79
b	.020	.039	0.51	0.99
b <sub>2</sub>	.045	.055	1.14	1.40
c	.016	.029	0.40	0.74
c <sub>2</sub>	.045	.055	1.14	1.40
D	.340	.390	8.64	9.65
D1	.315	.350	8.00	8.89
E	.380	.410	9.65	10.41
E1	.245	.320	6.22	8.13
e	.100 BSC		2.54 BSC	
L	.575	.625	14.61	15.88
L1	.090	.110	2.29	2.79
L2	.040	.055	1.02	1.40
L3	.050	.070	1.27	1.78
L4	0	.005	0	0.13

IXYS reserves the right to change limits, test conditions and dimensions.

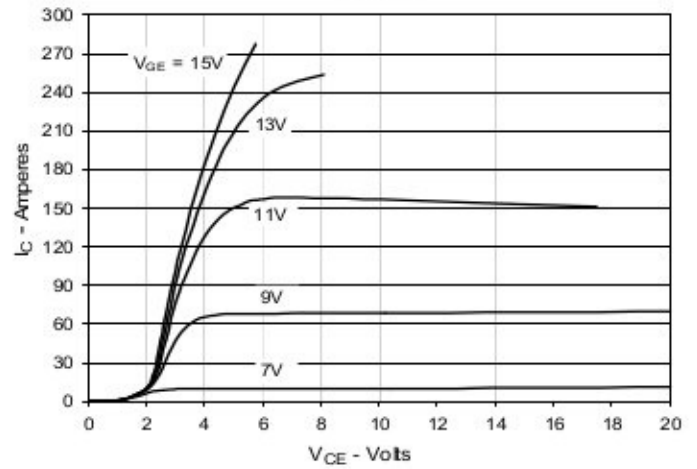
IXYS MOSFETs and IGBTs are covered by one or more of the following U.S. patents:

4,835,592	4,931,844	5,049,961	5,237,481	6,162,665	6,404,065 B1	6,683,344	6,727,585	7,005,734 B2	7,157,338 B2
4,850,072	5,017,508	5,063,307	5,381,025	6,259,123 B1	6,534,343	6,710,405 B2	6,759,692	7,063,975 B2	
4,881,106	5,034,796	5,187,117	5,486,715	6,306,728 B1	6,583,505	6,710,463	6,771,478 B2	7,071,537	

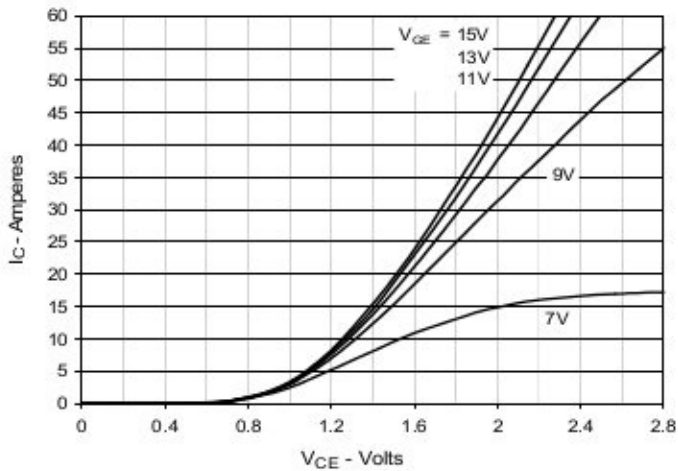
**Fig. 1. Output Characteristics  
@ 25°C**



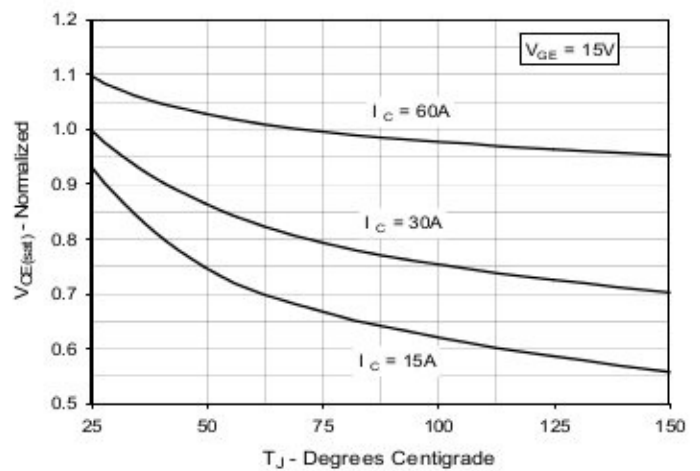
**Fig. 2. Extended Output Characteristics  
@ 25°C**



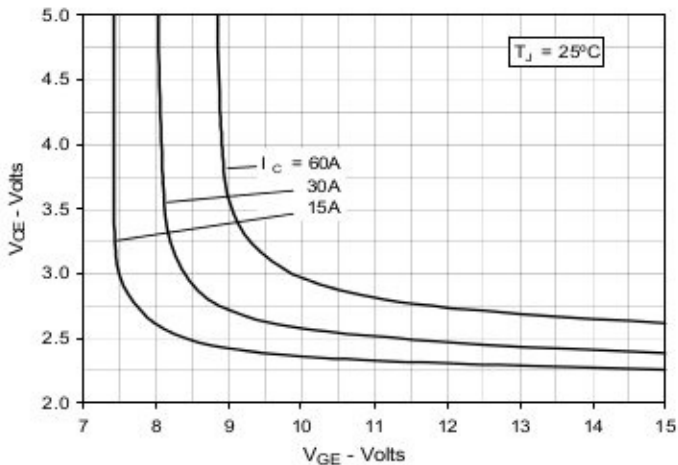
**Fig. 3. Output Characteristics  
@ 125°C**



**Fig. 4. Dependence of VCE(sat) on  
Junction Temperature**



**Fig. 5. Collector-to-Emitter Voltage  
vs. Gate-to-Emitter Voltage**



**Fig. 6. Input Admittance**

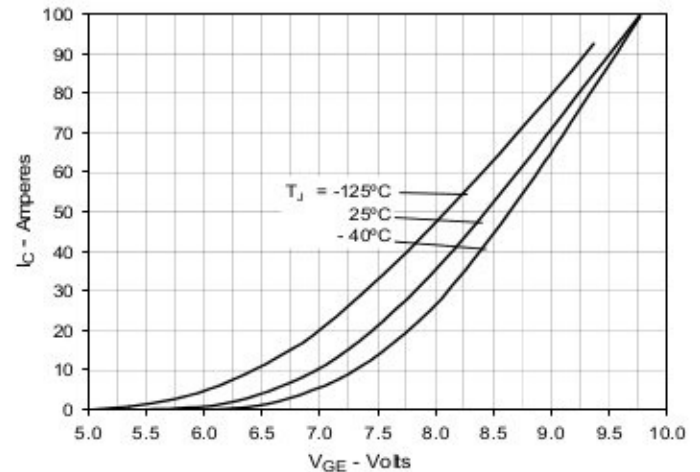


Fig. 7. Transconductance

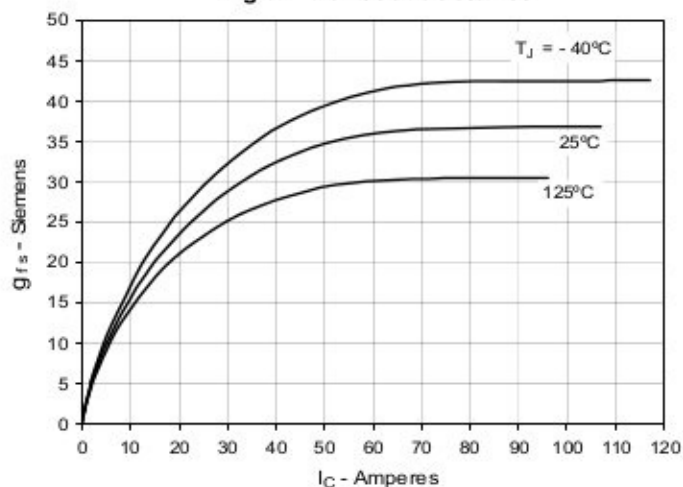


Fig. 8. Gate Charge

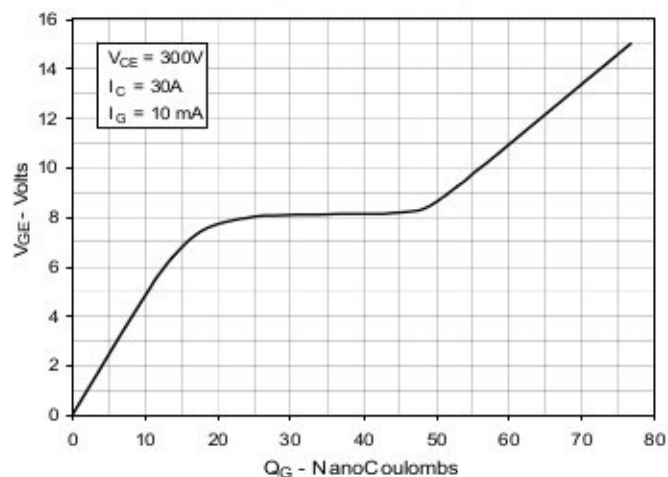


Fig. 9. Capacitance

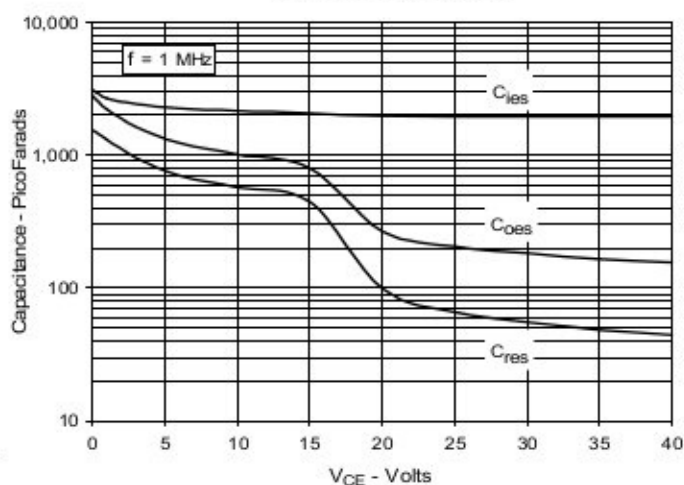


Fig. 10. Reverse-Bias Safe Operating Area

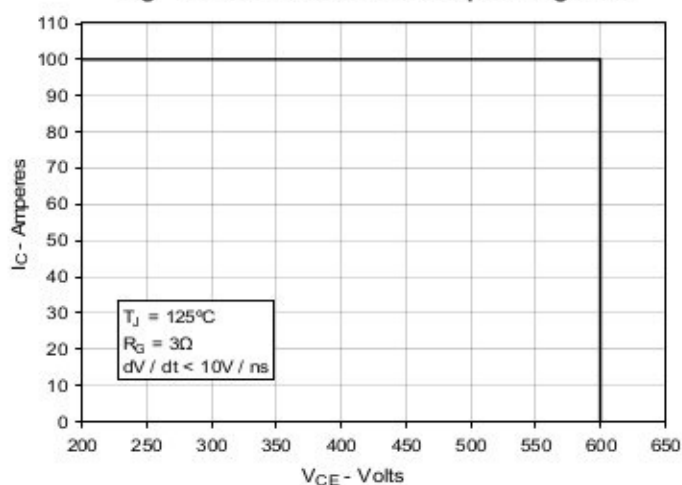
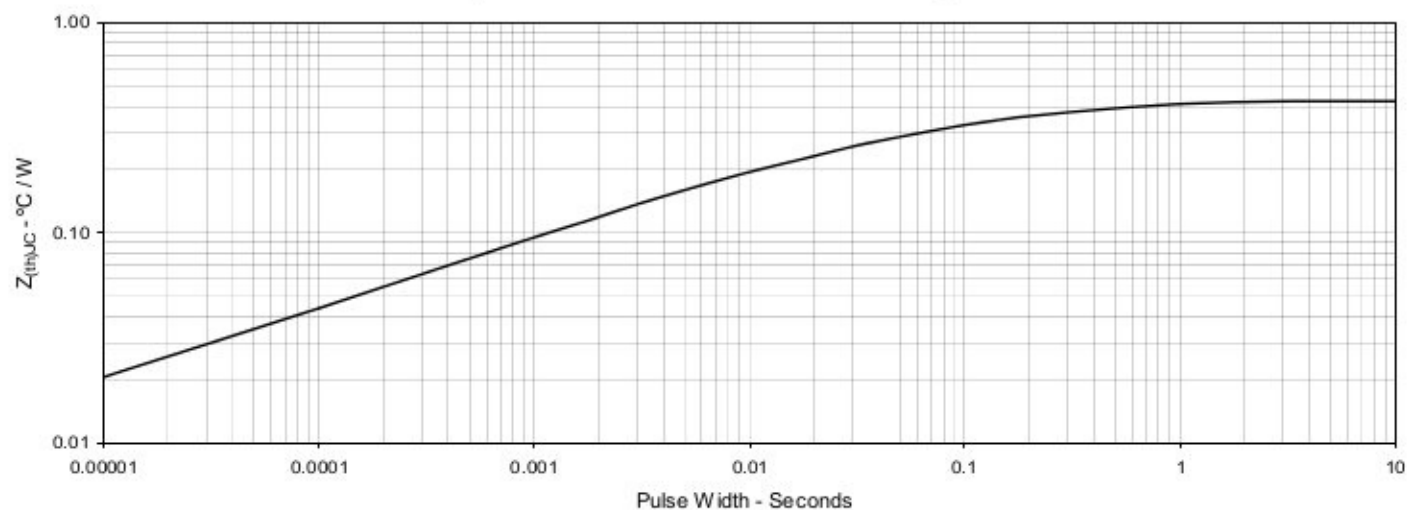
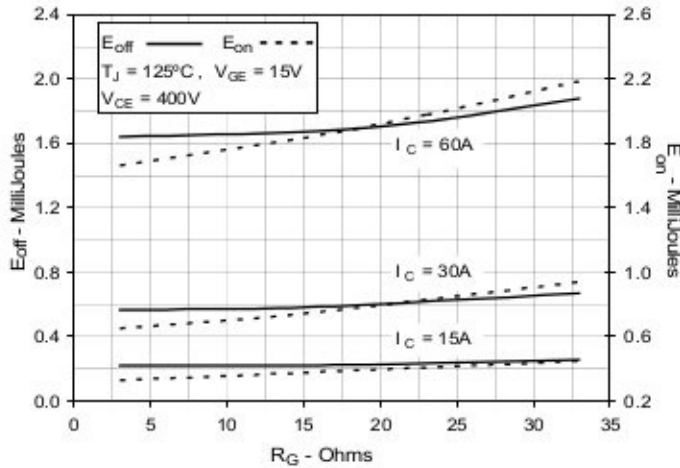


Fig. 11. Maximum Transient Thermal Impedance

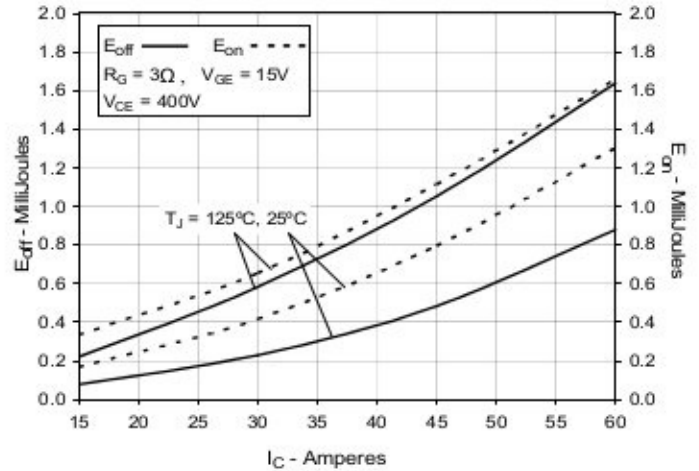




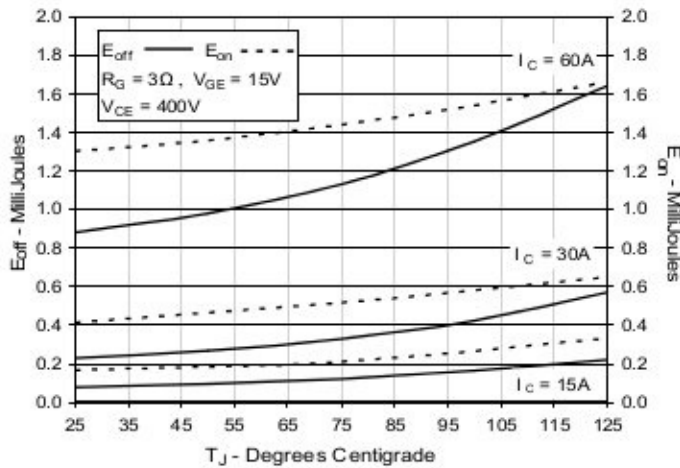
**Fig. 12. Inductive Switching  
Energy Loss vs. Gate Resistance**



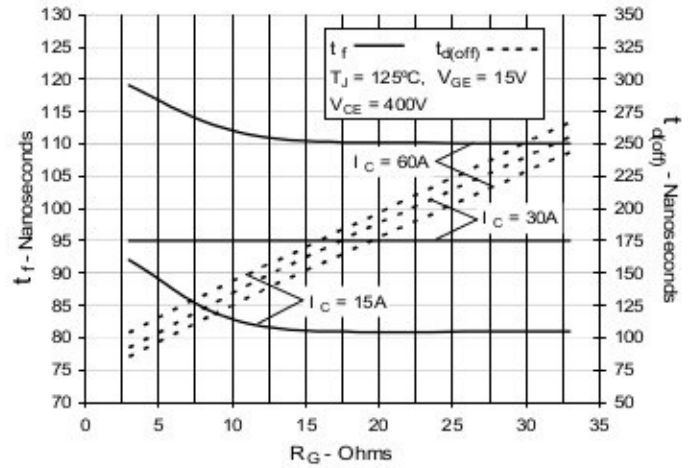
**Fig. 13. Inductive Switching  
Energy Loss vs. Collector Current**



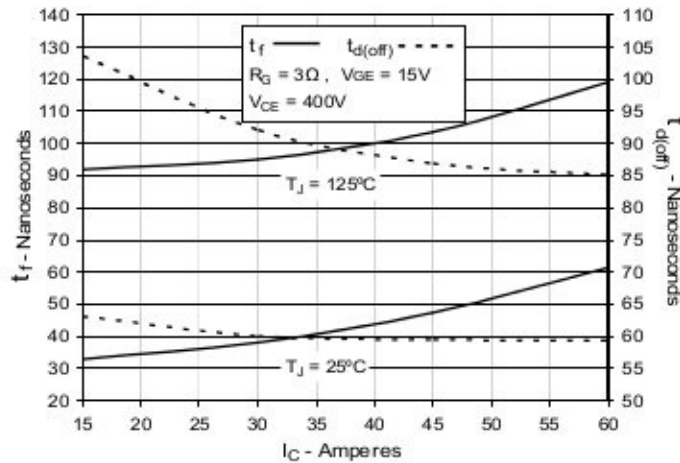
**Fig. 14. Inductive Switching  
Energy Loss vs. Junction Temperature**



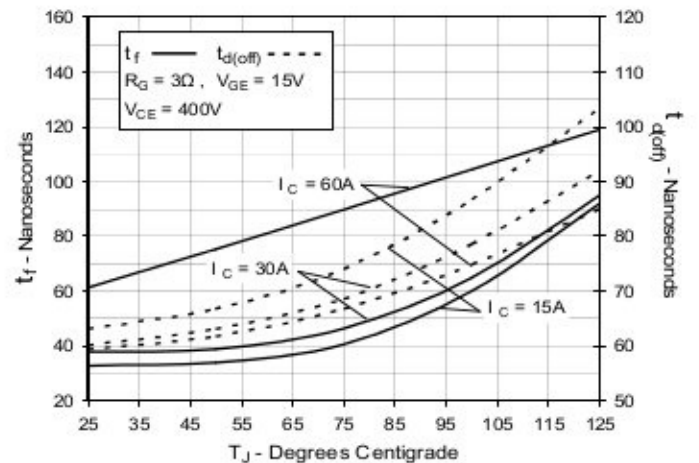
**Fig. 15. Inductive Turn-off  
Switching Times vs. Gate Resistance**



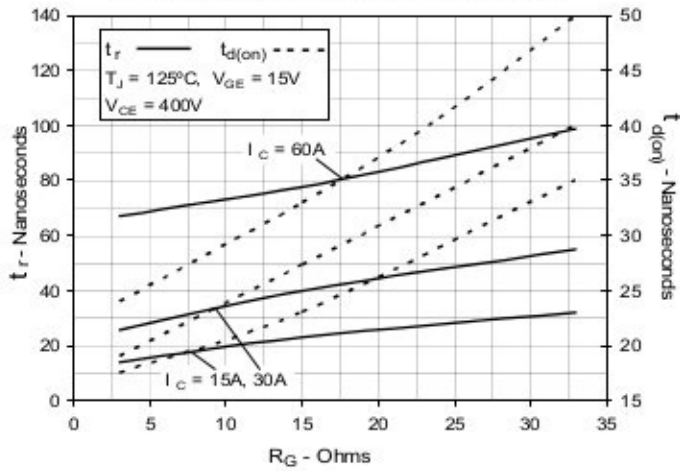
**Fig. 16. Inductive Turn-off  
Switching Times vs. Collector Current**



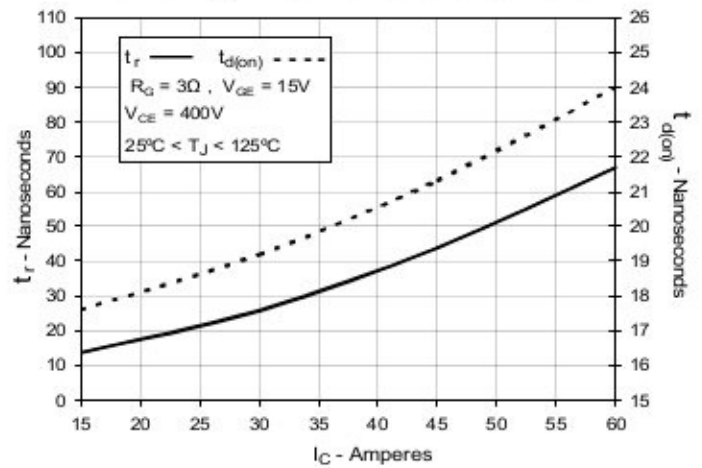
**Fig. 17. Inductive Turn-off  
Switching Times vs. Junction Temperature**



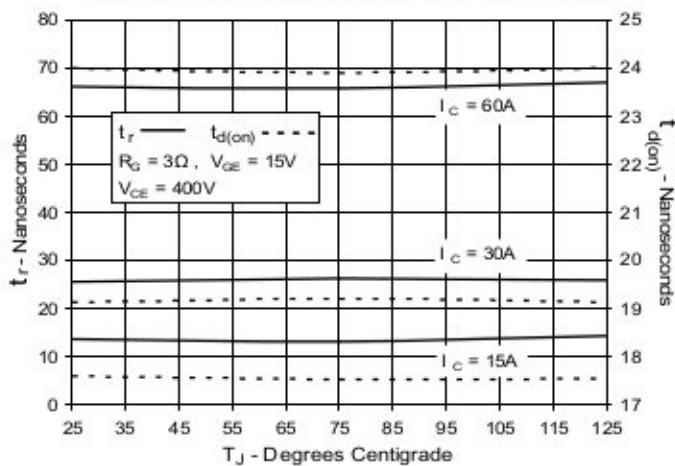
**Fig. 18. Inductive Turn-on  
Switching Times vs. Gate Resistance**



**Fig. 19. Inductive Turn-on  
Switching Times vs. Collector Current**



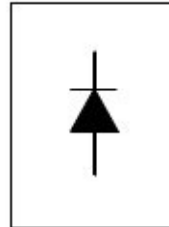
**Fig. 20. Inductive Turn-on  
Switching Times vs. Junction Temperature**



International  
**IR** Rectifier

**QUIETIR** Series  
40EPF..

## FAST SOFT RECOVERY RECTIFIER DIODE



$$\begin{aligned} V_F &< 1V @ 10A \\ t_{rr} &= 60ns \\ V_{RRM} &200 \text{ to } 600V \end{aligned}$$

### Description/Features

The 40EPF.. fast soft recovery **QUIETIR** rectifier series has been optimized for combined short reverse recovery time and low forward voltage drop.

The glass passivation ensures stable reliable operation in the most severe temperature and power cycling conditions.

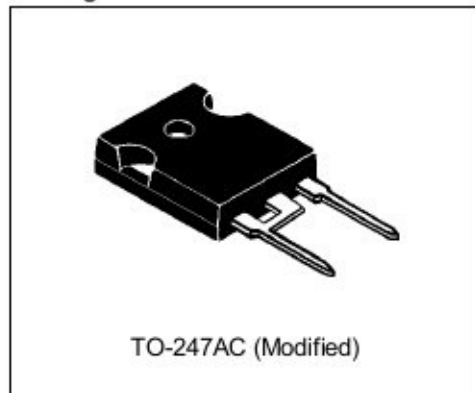
Typical applications are both:

- output rectification and freewheeling in inverters, choppers and converters
- and input rectifications where severe restrictions on conducted EMI should be met.

### Major Ratings and Characteristics

Characteristics	40EPF..	Units
$I_{F(AV)}$ Sinusoidal waveform	40	A
$V_{RRM}$	200 to 600	V
$I_{FSM}$	475	A
$V_F$ @ 10 A, $T_J = 25^\circ\text{C}$	1	V
$t_{rr}$ @ 1 A, - 100 A/ $\mu\text{s}$	60	ns
$T_J$	-40 to 150	$^\circ\text{C}$

### Package Outline



## Voltage Ratings

Part Number	$V_{RRM}$ , maximum peak reverse voltage V	$V_{RSM}$ , maximum non repetitive peak reverse voltage V	$I_{RRM}$ 150° C mA
40EPF02	200	300	7
40EPF04	400	500	
40EPF06	600	700	

## Absolute Maximum Ratings

Parameters	40EPF..	Units	Conditions
$I_{F(AV)}$ Max. Average Forward Current	40	A	@ $T_C = 105^\circ\text{C}$ , 180° conduction half sine wave
$I_{FSM}$ Max. Peak One Cycle Non-Repetitive Surge Current	400	A	10ms Sine pulse, rated $V_{RRM}$ applied
	475		10ms Sine pulse, no voltage reappplied
$I^2t$ Max. $I^2t$ for fusing	800	$A^2s$	10ms Sine pulse, rated $V_{RRM}$ applied
	1131		10ms Sine pulse, no voltage reappplied
$I^2t$ Max. $I^2t$ for fusing	11310	$A^2s$	$t = 0.1$ to 10ms, no voltage reappplied

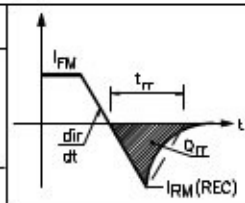
## Electrical Specifications

Parameters	40EPF..	Units	Conditions
$V_{FM}$ Max. Forward Voltage Drop	1.25	V	@ 40A, $T_J = 25^\circ\text{C}$
$r_t$ Forward slope resistance	4.4	m $\Omega$	$T_J = 125^\circ\text{C}$
$V_{F(TO)}$ Threshold voltage	1.1	V	
$I_{RM}$ Max. Reverse Leakage Current	0.1	mA	$T_J = 25^\circ\text{C}$
	7.0		$T_J = 150^\circ\text{C}$

$V_R = \text{rated } V_{RRM}$

## Recovery Characteristics

Parameters	40EPF..	Units	Conditions
$t_{rr}$ Reverse Recovery Time	180	ns	$I_F @ 40\text{Apk}$ @ 25A/ $\mu\text{s}$ @ 25°C
$I_{rr}$ Reverse Recovery Current	3.2	A	
$Q_{rr}$ Reverse Recovery Charge	0.5	$\mu\text{C}$	
S Snap Factor	0.5		



### Thermal-Mechanical Specifications

Parameters	40EPF..	Units	Conditions
$T_J$ Max. Junction Temperature Range	-40 to 150	°C	
$T_{stg}$ Max. Storage Temperature Range	-40 to 150	°C	
$R_{thJC}$ Max. Thermal Resistance Junction to Case	0.6	°C/W	DCoperation
$R_{thJA}$ Max. Thermal Resistance Junction to Ambient	40	°C/W	
$R_{thCS}$ Typical Thermal Resistance, Case to Heatsink	0.2	°C/W	Mounting surface , smooth and greased
wt Approximate Weight	6 (0.21)	g (oz.)	
T Mounting Torque	Min.	6 (5)	Kg-cm (lbf-in)
	Max.	12 (10)	
Case Style	TO-247AC		JEDEC (Modified)

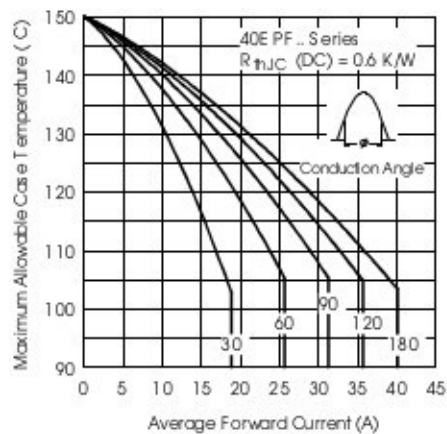


Fig. 1 - Current Rating Characteristics

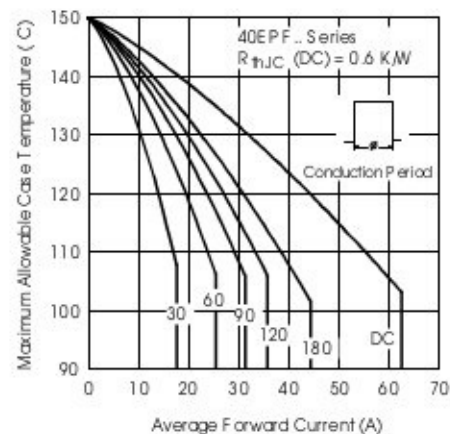


Fig. 2 - Current Rating Characteristics

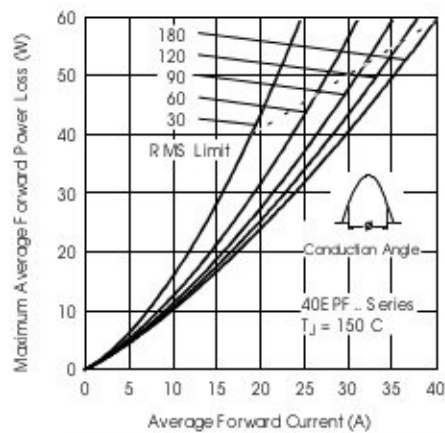


Fig. 3 - Forward Power Loss Characteristics

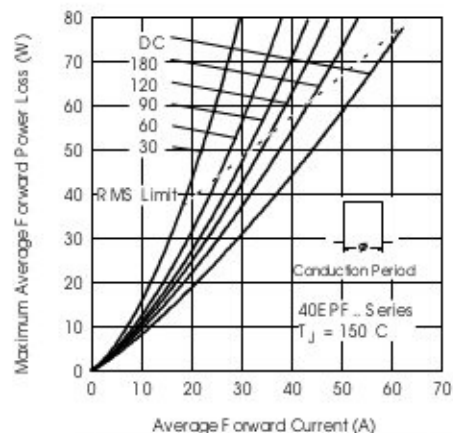


Fig. 4 - Forward Power Loss Characteristics

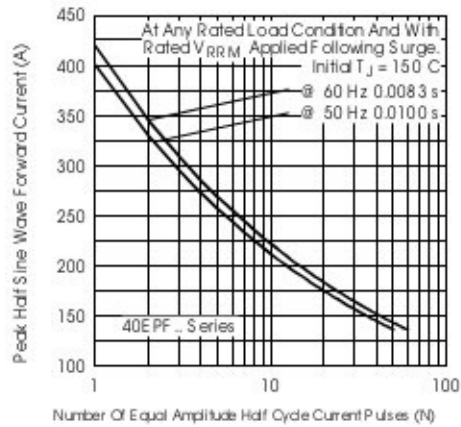


Fig. 5 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

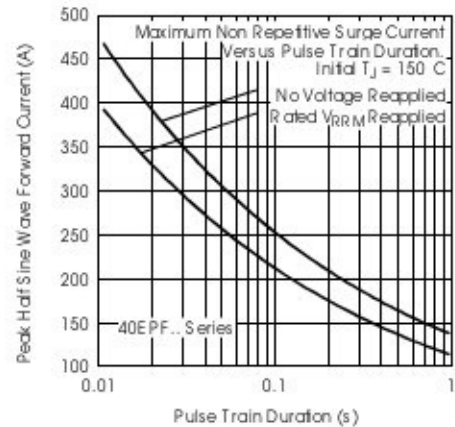


Fig. 6 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

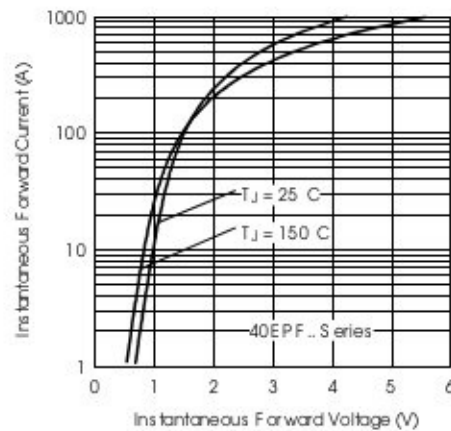


Fig. 7 - Forward Voltage Drop Characteristics

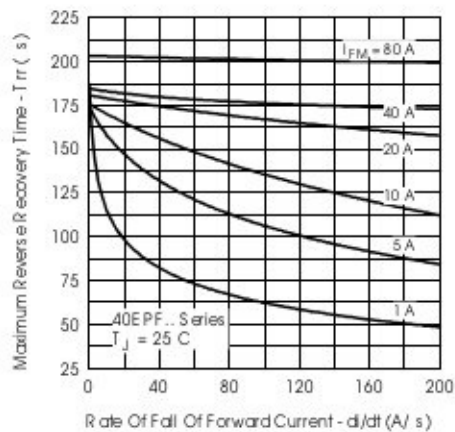


Fig. 8 - Recovery Time Characteristics,  $T_J = 25^\circ\text{C}$

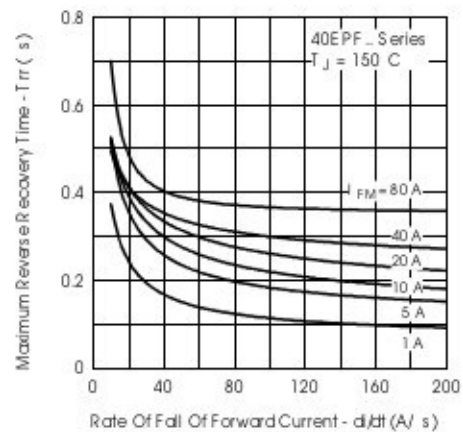


Fig. 9 - Recovery Time Characteristics,  $T_J = 150^\circ\text{C}$

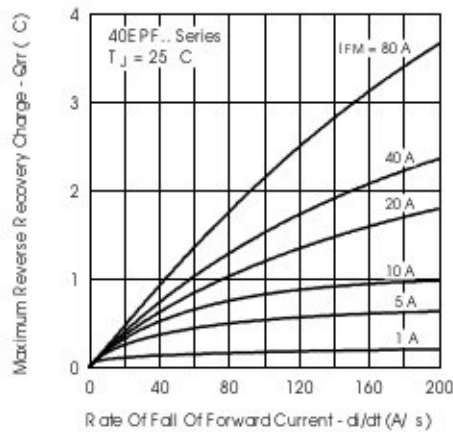


Fig. 10 - Recovery Charge Characteristics,  $T_J = 25^\circ\text{C}$

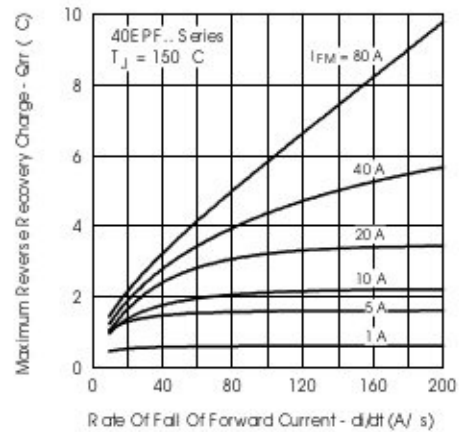


Fig. 11 - Recovery Charge Characteristics,  $T_J = 150^\circ\text{C}$

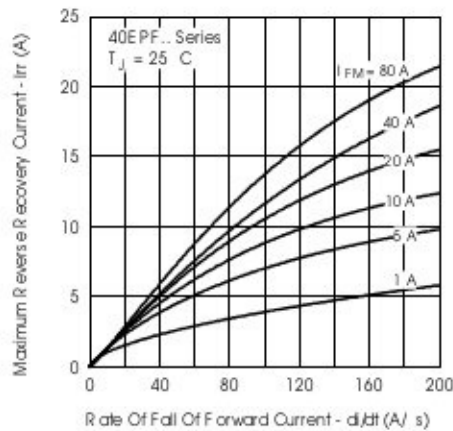


Fig. 12 - Recovery Current Characteristics,  $T_J = 25^\circ\text{C}$

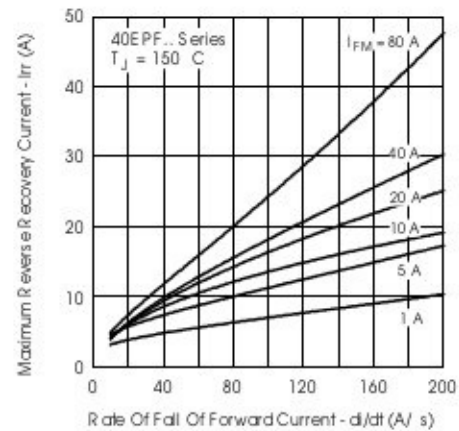


Fig. 13 - Recovery Current Characteristics,  $T_J = 150^\circ\text{C}$

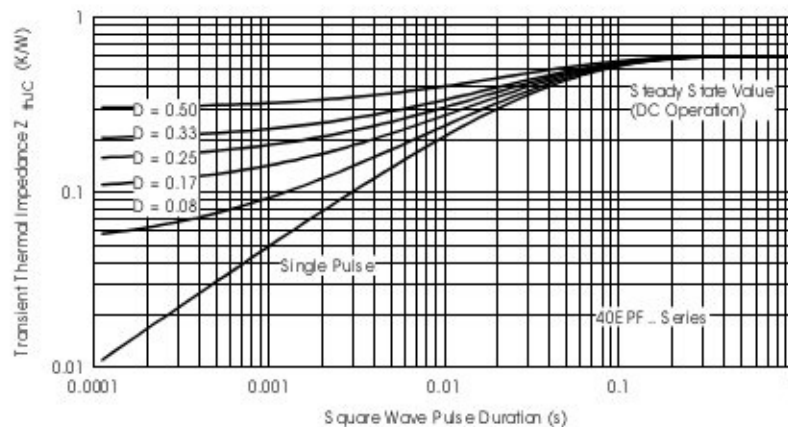
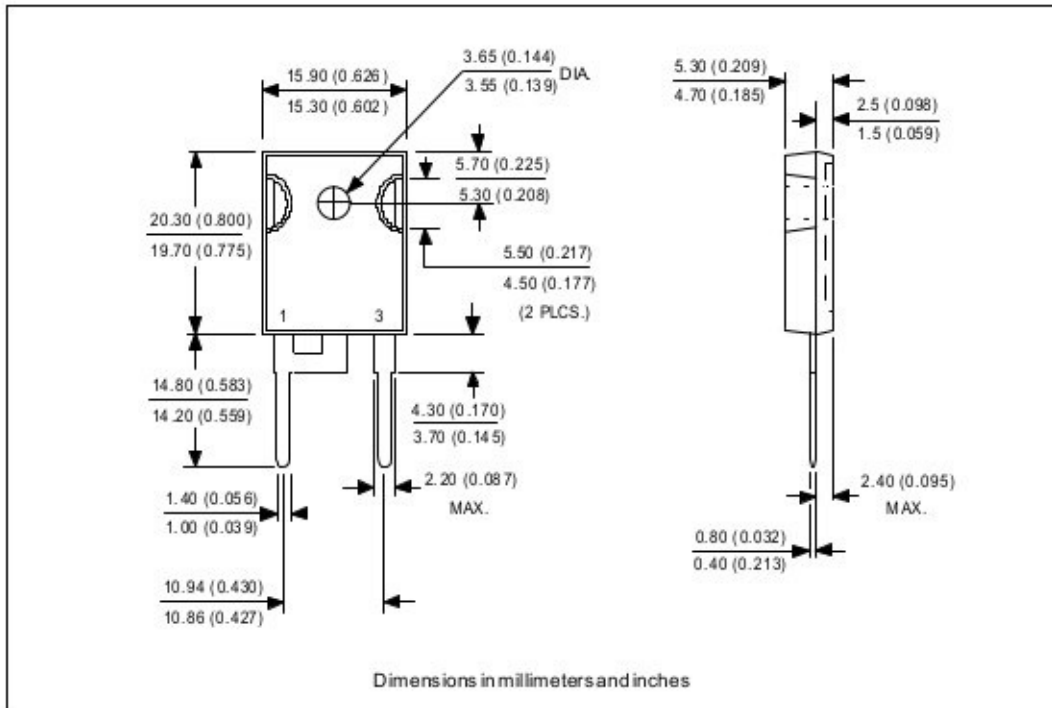


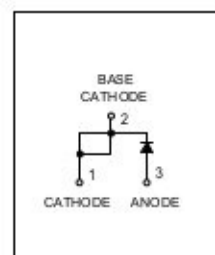
Fig. 14 - Thermal Impedance  $Z_{thJC}$  Characteristics

## Outline Table



## Ordering Information Table

Device Code				
40	E	P	F	06
①	②	③	④	⑤
1	- Current Rating			
2	- Circuit Configuration:			
	E = Single Diode			
3	- Package:			
	P = TO-247AC (Modified)			
4	- Type of Silicon:			
	F = Fast diode			
5	- Voltage code: Code x 100 = $V_{RRM}$			
	<div>02 = 200V</div> <div>04 = 400V</div> <div>06 = 600V</div>			





```

40EPF06
*****
* SPICE Model Diode *
*****
.SUBCKT 40EPF06 ANO CAT
D1 ANO 1 CAT
*Define diode model
.MODEL DMOD D(Is=122.1E-06 N=3.087 Rs=2.709E-03 Ikf=9.017 Xti=3 Eg=1.11
Cjo=550.8E-12 M=.272 Vj=1.523 Fc=.5 Isr=1.92E-21 Nr=4.755 Bv=730 +Ibv=35.43E-06)
*****

.ENDS 40EPF06

Thermal Model Subcircuit
.SUBCKT 40EPF06 5 1

CTHERM1 5 4 8.75E-04
CTHERM2 4 3 6.85E+00
CTHERM3 3 2 2.07E+01
CTHERM4 2 1 7.97E+01

RTHERM1 5 4 1.00E-07
RTHERM2 4 3 3.94E-01
RTHERM1 3 2 1.81E-01
RTHERM1 2 1 2.40E-02

.ENDS 40EPF06

```

Data and specifications subject to change without notice.  
This product has been designed and qualified for Industrial Level.  
Qualification Standards can be found on IR's Web site.

International  
**IR** Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105  
TAC Fax: (310) 252-7309

Visit us at [www.irf.com](http://www.irf.com) for sales contact information. 07/01

## Aluminum Capacitors

### Power High Ripple Current Screw Terminals

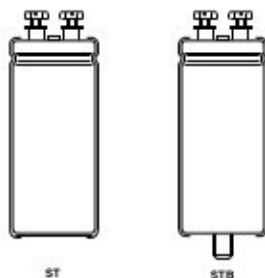


Fig. 1 Component outline


**RoHS**  
COMPLIANT

#### FEATURES

- Polarized aluminum electrolytic capacitors, non-solid electrolyte
- Large types, cylindrical aluminum case, insulated with a blue sleeve
- Pressure relief in the sealing
- Long useful life
- Compliant to RoHS directive 2002/95/EC

#### APPLICATIONS

- Buffering and filtering
- Motor drives, inverters, UPS and traction systems
- Pulsed power supplies

#### MARKING

The capacitors are marked with the following information:

- Rated capacitance (in  $\mu\text{F}$ )
- Tolerance on rated capacitance, code letter in accordance with IEC 60062 (M for  $\pm 20\%$ )
- Rated voltage (in V)
- Date code (YYMM)
- Name of manufacturer
- Code for factory of origin
- '-' sign to identify the negative terminal, visible from the top and side of the capacitor
- Code number
- Climatic category in accordance with IEC 60068

#### QUICK REFERENCE DATA

DESCRIPTION	VALUE	
	101	102
Nominal case size ( $\varnothing D \times L$ in mm)	35 x 60 to 90 x 220	
Rated capacitance range (E6 series), $C_R$	220 $\mu\text{F}$ to 1 F	
Tolerance on $C_R$	$\pm 20\%$	
Rated voltage range, $U_R$	25 V to 100 V	200 V to 450 V
Category temperature range	- 40 °C to + 85 °C	
Endurance test at 85 °C	2000 h	
Useful life at 85 °C	10 000 h ( $D \leq 50$ mm) 15 000 h ( $D \geq 65$ mm)	10 000 h
Useful life at 40 °C, 1.4 x IR applied	400 000 h ( $D \leq 50$ mm) 600 000 h ( $D \geq 65$ mm)	400 000 h
Shelf life at 0 V, 85 °C	500 h	
Based on sectional specification	IEC 60384-4/EN130300	
Climatic category IEC 60068	40/085/56	

#### SELECTION CHART FOR $C_R$ , $U_R$ AND RELEVANT NOMINAL CASE SIZES ( $\varnothing D \times L$ in mm)

$C_R$ ( $\mu\text{F}$ )	$U_R$ (V)									
	25	40	63	100	200	250	350	385	400	450
220	-	-	-	-	-	-	-	35 x 60	35 x 60	35 x 60
330	-	-	-	-	-	-	35 x 60	-	35 x 60	-
470	-	-	-	-	-	35 x 60	-	35 x 80	35 x 80	-
680	-	-	-	-	35 x 60	35 x 80	-	-	35 x 105	35 x 105
1000	-	-	-	-	35 x 80	35 x 80	-	50 x 80	50 x 80	50 x 80
1500	-	-	-	-	35 x 105	35 x 105	-	-	50 x 105	50 x 105
2200	-	-	-	35 x 60	50 x 80	50 x 80	50 x 105	-	-	65 x 105
3300	-	-	-	35 x 60	50 x 80	50 x 105	-	-	65 x 105	-
4700	-	-	35 x 60	35 x 80	-	65 x 105	76 x 105	76 x 105	-	76 x 146
5600	-	-	-	35 x 105	65 x 105	76 x 105	76 x 146	76 x 146	76 x 146	-

**SELECTION CHART FOR  $C_R$ ,  $U_R$  AND RELEVANT NOMINAL CASE SIZES ( $\varnothing D \times L$  in mm)**

$C_R$ ( $\mu F$ )	$U_R$ (V)									
	25	40	63	100	200	250	350	385	400	450
6800	-	-	35 x 60	35 x 105	65 x 105	76 x 105	-	-	76 x 146	76 x 220
	-	-	35 x 80	50 x 80	76 x 105	76 x 146	76 x 146	76 x 146	-	90 x 146
10 000	-	35 x 60	35 x 80	50 x 80	76 x 105	76 x 105	76 x 220	-	-	-
	-	-	35 x 105	50 x 105	76 x 146	76 x 146	90 x 146	-	-	90 x 220
15 000	35 x 60	35 x 60	35 x 105	50 x 105	76 x 146	76 x 146	-	-	-	-
	-	35 x 80	50 x 80	-	-	-	90 x 220	-	-	-
22 000	35 x 60	35 x 80	50 x 80	65 x 105	76 x 220	76 x 220	-	-	-	-
	-	50 x 80	50 x 105	76 x 105	90 x 146	90 x 146	-	-	-	-
33 000	35 x 80	35 x 105	50 x 105	76 x 105	-	-	-	-	-	-
	50 x 80	50 x 80	65 x 105	76 x 146	90 x 220	90 x 220	-	-	-	-
47 000	35 x 105	50 x 80	65 x 105	-	-	-	-	-	-	-
	50 x 80	50 x 105	76 x 105	76 x 146	-	-	-	-	-	-
68 000	50 x 80	50 x 105	76 x 105	76 x 146	-	-	-	-	-	-
	50 x 105	65 x 105	76 x 146	-	-	-	-	-	-	-
100 000	50 x 105	65 x 105	-	76 x 220	-	-	-	-	-	-
	65 x 105	76 x 105	76 x 146	90 x 146	-	-	-	-	-	-
150 000	65 x 105	76 x 105	76 x 146	-	-	-	-	-	-	-
	76 x 105	76 x 146	-	90 x 220	-	-	-	-	-	-
220 000	65 x 105	-	76 x 220	-	-	-	-	-	-	-
	76 x 105	76 x 146	90 x 146	-	-	-	-	-	-	-
330 000	76 x 146	76 x 220	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	90 x 146	90 x 220	-	-	-	-	-	-	-
470 000	76 x 220	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	90 x 146	90 x 220	-	-	-	-	-	-	-	-
680 000	76 x 220	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 000 000	90 x 220	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**DIMENSIONS in millimeters AND AVAILABLE FORMS**

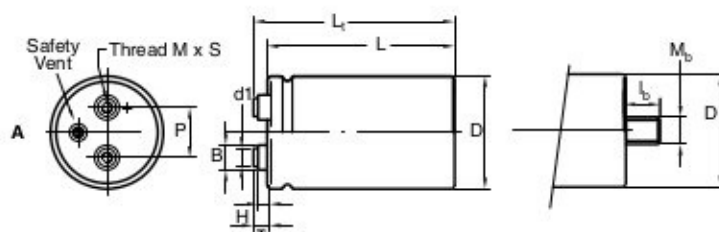


Fig. 2A: Standard M5 disc: screw terminal (ST) and screw terminal bolt nut (STB)

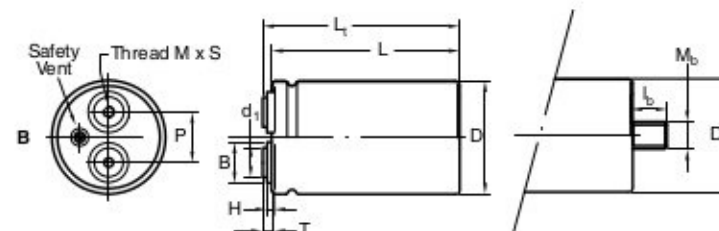


Fig. 2B: High current M6 disc: screw terminal (ST) and screw terminal bolt nut (STB)

Maximum permissible torque which may be applied to the termination screws: 2 Nm for M5; 2.5 Nm for M6  
For accessories refer to datasheet "Mounting Accessories".  
The capacitors are delivered with screws and washers.

Table 1

DIMENSIONS in millimeters, MASS AND PACKAGING QUANTITIES															
DESIGN	DRAWING	L ± 1	L <sub>1</sub> ± 1	D ± 1	P ± 0.3	T ± 0.2	H ± 0.3	B ± 0.3	d <sub>1</sub> ± 0.1	M	S - 0	Mb	I <sub>b</sub> ± 0.1	MASS (g)	PACKAGING QUANTITIES
35 x 60	2A	63.3	68.7	35.3	12.8	7.0	4.6	11.0	7.9	M5	9.5	M8	12.0	75	50
35 x 80	2A	81.3	86.7	35.3	12.8	7.0	4.6	11.0	7.9	M5	9.5	M8	12.0	95	50
35 x 105	2A	103.3	108.7	35.3	12.8	7.0	4.6	11.0	7.9	M5	9.5	M8	12.0	130	50
50 x 80	2A	82.8	88.8	51.0	22.2	7.1	4.8	11.0	7.9	M5	9.5	M12	16.0	200	25
50 x 105	2A	104.8	110.8	51.0	22.2	7.1	4.8	11.0	7.9	M5	9.5	M12	16.0	300	25
65 x 105	2A	104.8	110.7	65.0	28.5	7.0	4.6	11.9	7.9	M5	9.5	M12	16.0	480	16
65 x 105 HC	2B	104.8	109.2	65.0	28.5	5.5	3.5	18.0	13.0	M6	8.5	M12	16.0	480	16
76 x 105	2A	105.8	111.7	76.4	31.8	7.0	4.6	11.7	7.9	M5	9.5	M12	16.0	700	12
76 x 105 HC	2B	105.8	110.2	76.4	31.8	5.5	3.5	18.3	13.0	M6	8.5	M12	16.0	700	12
76 x 114	2A	115.8	121.7	76.4	31.8	7.0	4.6	11.7	7.9	M5	9.5	M12	16.0	800	12
76 x 114 HC	2B	115.8	120.2	76.4	31.8	5.5	3.5	18.3	13.0	M6	8.5	M12	16.0	800	12
76 x 146	2A	145.8	151.7	76.4	31.8	7.0	4.6	11.7	7.9	M5	9.5	M12	16.0	1000	12
76 x 146 HC	2B	145.8	150.2	76.4	31.8	5.5	3.5	18.3	13.0	M6	8.5	M12	16.0	1000	12
76 x 220	2A	219.8	225.7	76.4	31.8	7.0	4.6	11.7	7.9	M5	9.5	M12	16.0	1500	10
76 x 220 HC	2B	219.8	224.2	76.4	31.8	5.5	3.5	18.3	13.0	M6	8.5	M12	16.0	1500	10
90 x 146 HC	2B	150.1	155.4	89.4	31.8	7.9	0.0	13.0	13.0	M6	10.0	M12	16.0	1300	10
90 x 220 HC	2B	218.1	223.4	89.4	31.8	7.9	0.0	13.0	13.0	M6	10.0	M12	16.0	2000	10

**Notes**

- For bolt version holds:
- 1. L = L standard - 0.5 mm
- 2. L<sub>1</sub> = L<sub>1</sub> standard - 0.5 mm

ELECTRICAL DATA	
SYMBOL	DESCRIPTION
C <sub>R</sub>	rated capacitance at 100 Hz, tolerance ± 20 %
I <sub>R</sub>	rated RMS ripple current at 100 Hz, 85 °C
I <sub>L5</sub>	max. leakage current after 5 minutes at U <sub>R</sub>
ESR	max. equivalent series resistance at 100 Hz
Z	max. impedance at 20 kHz

**Note**

- Unless otherwise specified, all electrical values in tables 2 and 3 apply at T<sub>amb</sub> = 20 °C, P = 86 kPa to 106 kPa, RH = 45 % to 75 %.

**ORDERING EXAMPLE**

Electrolytic capacitor 101 series

10 000 µF/40 V; ± 20 %

Nominal case size: Ø 35 mm x 60 mm;  
ST version, high post M5 disc

Ordering code: MAL2101 17103 E3

Former 12NC: 2222 101 17103



Aluminum Capacitors  
Power High Ripple Current Screw Terminals

Vishay BCcomponents

Table 2

ELECTRICAL DATA AND ORDERING INFORMATION FOR 101 SERIES										
U <sub>R</sub> (V)	C <sub>R</sub> 100 Hz (μF)	NOMINAL CASE SIZE Ø D x L (mm)	I <sub>R</sub> 100 Hz 85 °C (A)	I <sub>LS</sub> 5 min (mA)	ESR max. 100 Hz (mΩ)	Z max. 20 kHz (mΩ)	STANDARD HIGH POST M5 DISC		HIGH CURRENT M6 DISC	
							ST ORDERING CODE MAL2101.....	ST BOLT NUT ORDERING CODE MAL2101.....	ST ORDERING CODE MAL2101.....	ST BOLT NUT ORDERING CODE MAL2101.....
25	15 000	35 x 60	7.7	0.75	29	22	16153E3	56153E3	-	-
	22 000	35 x 60	8.3	1.10	27	22	16223E3	56223E3	-	-
	33 000	35 x 80	9.0	1.65	19	17	16333E3	56333E3	-	-
	33 000	50 x 80	10.0	1.65	17	14	26333E3	66333E3	-	-
	47 000	35 x 105	12.1	2.35	15	13	16473E3	56473E3	-	-
	47 000	50 x 80	14.8	2.35	12	10	26473E3	66473E3	-	-
	68 000	50 x 80	12.8	3.40	15	13	16683E3	56683E3	-	-
	68 000	50 x 105	17.1	3.40	9	8	26683E3	66683E3	-	-
	100 000	50 x 105	14.7	5.00	12	11	16104E3	56104E3	-	-
	100 000	65 x 105	19.6	5.00	7	6	26104E3	66104E3	46104E3	86104E3
	150 000	65 x 105	17.6	7.50	8	7	16154E3	56154E3	36154E3	76154E3
	150 000	76 x 105	21.4	7.50	6	5	26154E3	66154E3	46154E3	86154E3
	220 000	65 x 105	20.2	11.0	6	5	16224E3	56224E3	36224E3	76224E3
	220 000	76 x 105	22.5	11.0	6	5	26224E3	66224E3	46224E3	86224E3
	330 000	76 x 146	25.8	16.5	4	4	26334E3	66334E3	46334E3	86334E3
	470 000	76 x 220	29.9	23.5	5	5	16474E3	56474E3	36474E3	76474E3
	470 000	90 x 146	38.2	23.5	5	5	-	-	46474E3	86474E3
40	680 000	76 x 220	29.0	34.0	5	5	16684E3	56684E3	36684E3	76684E3
	1 000 000	90 x 220	46.6	50.0	5	5	-	-	46105E3	86105E3
	10 000	35 x 60	7.1	0.80	31	23	17103E3	57103E3	-	-
	15 000	35 x 60	7.8	1.20	28	22	17153E3	57153E3	-	-
	15 000	35 x 80	8.7	1.20	22	17	27153E3	67153E3	-	-
	22 000	35 x 80	9.4	1.76	20	17	17223E3	57223E3	-	-
	22 000	50 x 80	11.2	1.76	19	15	27223E3	67223E3	-	-
	33 000	35 x 105	11.0	2.64	15	13	17333E3	57333E3	-	-
	33 000	50 x 80	13.7	2.64	13	10	27333E3	67333E3	-	-
	47 000	50 x 80	14.6	3.76	12	10	17473E3	57473E3	-	-
	47 000	50 x 105	15.9	3.76	10	8	27473E3	67473E3	-	-
	68 000	50 x 105	16.9	5.44	9	8	17683E3	57683E3	-	-
	68 000	65 x 105	18.1	5.44	7	6	27683E3	67683E3	47683E3	87683E3
	100 000	65 x 105	19.2	8.0	7	6	17104E3	57104E3	37104E3	77104E3
	100 000	76 x 105	21.3	8.0	7	6	27104E3	67104E3	47104E3	87104E3
	150 000	76 x 105	20.5	12.0	7	6	17154E3	57154E3	37154E3	77154E3
	150 000	76 x 146	24.0	12.0	5	5	27154E3	67154E3	47154E3	87154E3
	220 000	76 x 146	24.5	17.6	5	5	27224E3	67224E3	47224E3	87224E3
	330 000	76 x 220	28.2	26.4	5	5	17334E3	57334E3	37334E3	77334E3
	330 000	90 x 146	38.6	26.4	5	5	-	-	47334E3	87334E3
	470 000	90 x 220	41.5	37.6	5	5	-	-	47474E3	87474E3

**ELECTRICAL DATA AND ORDERING INFORMATION FOR 101 SERIES**

U <sub>R</sub> (V)	C <sub>R</sub> 100 Hz (μF)	NOMINAL CASE SIZE Ø D x L (mm)	I <sub>R</sub> 100 Hz 85 °C (A)	I <sub>L5</sub> 5 min (mA)	ESR max. 100 Hz (mΩ)	Z max. 20 kHz (mΩ)	STANDARD HIGH POST M5 DISC		HIGH CURRENT M6 DISC	
							ST ORDERING CODE MAL2101.....	ST BOLT NUT ORDERING CODE MAL2101.....	ST ORDERING CODE MAL2101.....	ST BOLT NUT ORDERING CODE MAL2101.....
63	4700	35 x 60	5.9	0.59	42	25	18472E3	58472E3	-	-
	6800	35 x 60	6.6	0.86	38	25	18682E3	58682E3	-	-
	6800	35 x 80	7.3	0.86	30	19	28682E3	68682E3	-	-
	10 000	35 x 80	8.1	1.26	27	19	18103E3	58103E3	-	-
	10 000	35 x 105	8.8	1.26	22	14	28103E3	68103E3	-	-
	15 000	35 x 105	9.7	1.89	19	14	18153E3	58153E3	-	-
	15 000	50 x 80	12.1	1.89	16	11	28153E3	68153E3	-	-
	22 000	50 x 80	11.1	2.77	19	15	18223E3	58223E3	-	-
	22 000	50 x 105	14.3	2.77	12	9	28223E3	68223E3	-	-
	33 000	50 x 105	12.9	4.16	14	12	18333E3	58333E3	-	-
	33 000	65 x 105	16.5	4.16	9	6	28333E3	68333E3	48333E3	88333E3
	47 000	65 x 105	15.6	5.92	10	8	18473E3	58473E3	38473E3	78473E3
	47 000	76 x 105	18.6	5.92	8	6	28473E3	68473E3	48473E3	88473E3
	68 000	76 x 105	20.0	8.57	7	6	18683E3	58683E3	38683E3	78683E3
	68 000	76 x 146	21.9	8.57	6	5	28683E3	68683E3	48683E3	88683E3
	100 000	76 x 146	23.4	12.6	5	5	28104E3	68104E3	48104E3	88104E3
	150 000	76 x 146	22.2	18.9	6	5	18154E3	58154E3	38154E3	78154E3
	220 000	76 x 220	27.0	27.7	5	5	18224E3	58224E3	38224E3	78224E3
	220 000	90 x 146	36.5	27.7	5	5	-	-	48224E3	88224E3
	330 000	90 x 220	42.9	41.6	5	5	-	-	48334E3	88334E3
100	2200	35 x 60	5.2	0.44	50	29	19222E3	59222E3	-	-
	3300	35 x 60	6.0	0.66	42	27	19332E3	59332E3	-	-
	3300	35 x 80	6.6	0.66	35	21	29332E3	69332E3	-	-
	4700	35 x 80	7.3	0.94	31	20	19472E3	59472E3	-	-
	4700	35 x 105	7.9	0.94	26	16	29472E3	69472E3	-	-
	6800	35 x 105	8.8	1.36	23	15	19682E3	59682E3	-	-
	6800	50 x 80	10.9	1.36	19	12	29682E3	69682E3	-	-
	10 000	50 x 80	10.5	2.00	21	15	19103E3	59103E3	-	-
	10 000	50 x 105	13.1	2.00	14	9	29103E3	69103E3	-	-
	15 000	50 x 105	12.3	3.00	16	12	19153E3	59153E3	-	-
	22 000	65 x 105	14.8	4.40	11	8	19223E3	59223E3	39223E3	79223E3
	22 000	76 x 105	17.4	4.40	9	6	29223E3	69223E3	49223E3	89223E3
	33 000	76 x 105	19.0	6.60	8	6	19333E3	59333E3	39333E3	79333E3
	33 000	76 x 146	20.7	6.60	7	5	29333E3	69333E3	49333E3	89333E3
	47 000	76 x 146	22.4	9.40	6	5	29473E3	69473E3	49473E3	89473E3
	68 000	76 x 146	25.6	13.6	6	5	19683E3	59683E3	39683E3	79683E3
	100 000	76 x 220	31.2	20.0	5	5	19104E3	59104E3	39104E3	79104E3
	100 000	90 x 146	41.5	20.0	5	5	-	-	49104E3	89104E3
	150 000	90 x 220	49.1	30.0	5	5	-	-	49154E3	89154E3



# Aluminum Capacitors Power High Ripple Current Screw Terminals

**101/102 PHR-ST**  
Vishay BCcomponents

Table 3

ELECTRICAL DATA AND ORDERING INFORMATION FOR 102 SERIES										
U <sub>R</sub> (V)	C <sub>R</sub> 100 Hz (μF)	NOMINAL CASE SIZE Ø D x L (mm)	I <sub>R</sub> 100 Hz 85 °C (A)	I <sub>LS</sub> 5 min (mA)	ESR max. 100 Hz (mΩ)	Z max. 20 kHz (mΩ)	HIGH POST M5 DISC		HIGH CURRENT M6 DISC	
							ST ORDERING CODE	ST BOLT NUT ORDERING CODE	ST ORDERING CODE	ST BOLT NUT ORDERING CODE
							MAL2102.....	MAL2102.....	MAL2102.....	MAL2102.....
200	680	35 x 60	3.5	0.27	207	136	12681E3	52681E3	-	-
	1000	35 x 80	4.4	0.40	144	95	12102E3	52102E3	-	-
	1000	35 x 105	4.7	0.40	140	91	22102E3	62102E3	-	-
	1500	35 x 105	5.5	0.60	100	67	12152E3	52152E3	-	-
	1500	50 x 80	6.2	0.60	106	74	22152E3	62152E3	-	-
	2200	50 x 80	8.0	0.88	67	44	12222E3	52222E3	-	-
	3300	50 x 80	8.9	1.32	50	35	12332E3	52332E3	-	-
	3300	50 x 105	9.9	1.32	46	32	22332E3	62332E3	-	-
	4700	65 x 105	12.5	1.88	37	26	22472E3	62472E3	42472E3	82472E3
	6800	65 x 105	15.2	2.72	25	18	12682E3	52682E3	32682E3	72682E3
	6800	76 x 105	16.9	2.72	25	18	22682E3	62682E3	42682E3	82682E3
	10 000	76 x 105	19.9	4.00	18	13	12103E3	52103E3	32103E3	72103E3
	10 000	76 x 146	20.4	4.00	18	13	22103E3	62103E3	42103E3	82103E3
	15 000	76 x 146	24.1	6.00	12	9	12153E3	52153E3	32153E3	72153E3
	22 000	76 x 220	29.5	8.8	9	7	12223E3	52223E3	32223E3	72223E3
22 000	90 x 146	34.1	8.8	8	6	-	-	42223E3	82223E3	
33 000	90 x 220	41.7	13.2	6	5	-	-	42333E3	82333E3	
250	470	35 x 60	3.1	0.24	250	152	13471E3	53471E3	-	-
	680	35 x 80	3.8	0.34	175	107	13681E3	53681E3	-	-
	1000	35 x 80	4.4	0.50	128	82	13102E3	53102E3	-	-
	1000	35 x 105	4.8	0.50	122	76	23102E3	63102E3	-	-
	1500	35 x 105	5.4	0.75	90	58	13152E3	53152E3	-	-
	1500	50 x 80	7.0	0.75	81	50	23152E3	63152E3	-	-
	2200	50 x 80	8.0	1.10	60	39	13222E3	53222E3	-	-
	2200	50 x 105	8.7	1.10	57	35	23222E3	63222E3	-	-
	3300	50 x 105	9.8	1.65	42	28	13332E3	53332E3	-	-
	3300	65 x 105	11.4	1.65	42	28	23332E3	63332E3	43332E3	83332E3
	4700	65 x 105	13.8	2.35	29	19	13472E3	53472E3	33472E3	73472E3
	4700	76 x 105	15.3	2.35	29	19	23472E3	63472E3	43472E3	83472E3
	6800	76 x 105	18.1	3.40	21	14	13682E3	53682E3	33682E3	73682E3
	6800	76 x 146	18.6	3.40	21	14	23682E3	63682E3	43682E3	83682E3
	10 000	76 x 105	19.3	5.00	17	12	13103E3	53103E3	33103E3	73103E3
	10 000	76 x 146	22.0	5.00	15	10	23103E3	63103E3	43103E3	83103E3
	15 000	76 x 146	23.3	7.5	12	10	13153E3	53153E3	33153E3	73153E3
	22 000	76 x 220	29.1	11.0	9	7	13223E3	53223E3	33223E3	73223E3
	22 000	90 x 146	35.3	11.0	7	5	-	-	43223E3	83223E3
	33 000	90 x 220	43.2	16.5	5	5	-	-	43333E3	83333E3
350	330	35 x 60	2.5	0.23	435	305	15331E3	55331E3	-	-
	470	35 x 80	3.1	0.33	308	216	25471E3	65471E3	-	-
	680	35 x 105	3.8	0.48	216	152	25681E3	65681E3	-	-
	1000	50 x 80	5.6	0.70	145	102	25102E3	65102E3	-	-
	1500	50 x 80	6.5	1.05	102	74	15152E3	55152E3	-	-
	1500	50 x 105	7.0	1.05	99	70	25152E3	65152E3	-	-
	2200	50 x 105	8.0	1.54	72	52	15222E3	55222E3	-	-
	2200	65 x 105	9.3	1.54	72	52	25222E3	65222E3	45222E3	85222E3
	3300	65 x 105	11.4	2.31	48	35	25332E3	65332E3	45332E3	85332E3
	4700	76 x 105	15.0	3.29	34	25	15472E3	55472E3	35472E3	75472E3
	4700	76 x 146	15.4	3.29	34	25	25472E3	65472E3	45472E3	85472E3
	6800	76 x 146	18.3	4.76	24	18	25682E3	65682E3	45682E3	85682E3
	10 000	76 x 220	23.2	7.0	15	12	15103E3	55103E3	35103E3	75103E3
	10 000	90 x 146	25.1	7.0	15	12	-	-	45103E3	85103E3
	15 000	90 x 220	31.2	10.5	10	8	-	-	45153E3	85153E3



**ELECTRICAL DATA AND ORDERING INFORMATION FOR 102 SERIES**

U <sub>R</sub> (V)	C <sub>R</sub> 100 Hz (μF)	NOMINAL CASE SIZE Ø D x L (mm)	I <sub>R</sub> 100 Hz 85 °C (A)	I <sub>L5</sub> 5 min (mA)	ESR max. 100 Hz (mΩ)	Z max. 20 kHz (mΩ)	HIGH POST M5 DISC		HIGH CURRENT M6 DISC	
							ST ORDERING CODE	ST BOLT NUT ORDERING CODE	ST ORDERING CODE	ST BOLT NUT ORDERING CODE
							MAL2102.....	MAL2102.....	MAL2102.....	MAL2102.....
385	220	35 x 60	2.1	0.17	575	380	18221E3	58221E3	-	-
	330	35 x 80	2.7	0.26	386	257	18331E3	58331E3	-	-
	470	35 x 80	3.1	0.37	279	188	18471E3	58471E3	-	-
	680	35 x 105	3.9	0.53	196	133	18681E3	58681E3	-	-
	1000	50 x 80	5.6	0.77	132	89	18102E3	58102E3	-	-
	1500	50 x 105	7.1	1.16	90	61	18152E3	58152E3	-	-
	2200	65 x 105	10.0	1.70	61	42	18222E3	58222E3	38222E3	78222E3
	3300	76 x 105	13.4	2.55	42	29	18332E3	58332E3	38332E3	78332E3
	4700	76 x 105	15.0	3.62	31	22	18472E3	58472E3	38472E3	78472E3
	4700	76 x 146	16.3	3.62	29	20	28472E3	68472E3	48472E3	88472E3
	6800	76 x 146	18.3	5.24	22	16	18682E3	58682E3	38682E3	78682E3
400	220	35 x 60	2.1	0.18	557	363	16221E3	56221E3	-	-
	330	35 x 60	2.5	0.26	383	254	16331E3	56331E3	-	-
	330	35 x 80	2.7	0.26	374	245	26331E3	66331E3	-	-
	470	35 x 80	3.1	0.38	271	180	16471E3	56471E3	-	-
	470	35 x 105	3.3	0.38	265	175	26471E3	66471E3	-	-
	680	35 x 105	3.9	0.55	191	128	16681E3	56681E3	-	-
	680	50 x 80	4.5	0.54	199	136	26681E3	66681E3	-	-
	1000	50 x 80	5.7	0.80	128	86	16102E3	56102E3	-	-
	1000	50 x 105	6.0	0.80	125	83	26102E3	66102E3	-	-
	1500	50 x 105	7.1	1.20	88	59	26152E3	66152E3	-	-
	2200	65 x 105	10.0	1.76	60	40	26222E3	66222E3	46222E3	86222E3
	3300	65 x 105	12.1	2.64	40	27	16332E3	56332E3	36332E3	76332E3
	3300	76 x 105	13.4	2.64	40	27	26332E3	66332E3	46332E3	86332E3
	4700	76 x 105	15.0	3.76	31	21	16472E3	56472E3	36472E3	76472E3
	4700	76 x 146	16.4	3.76	28	19	26472E3	66472E3	46472E3	86472E3
	6800	76 x 146	18.3	5.44	22	15	26682E3	66682E3	46682E3	86682E3
	10000	76 x 220	22.1	8.0	14	11	16103E3	56103E3	36103E3	76103E3
450	220	35 x 60	2.1	0.20	503	313	17221E3	57221E3	-	-
	330	35 x 80	2.7	0.30	339	212	27331E3	67331E3	-	-
	470	35 x 105	3.4	0.42	241	151	27471E3	67471E3	-	-
	680	50 x 80	4.9	0.61	159	98	27681E3	67681E3	-	-
	1000	50 x 80	5.7	0.90	118	75	17102E3	57102E3	-	-
	1000	50 x 105	6.1	0.90	114	72	27102E3	67102E3	-	-
	1500	50 x 105	7.1	1.35	81	52	17152E3	57152E3	-	-
	1500	65 x 105	8.3	1.35	81	52	27152E3	67152E3	47152E3	87152E3
	2200	65 x 105	10.1	1.98	55	35	17222E3	57222E3	37222E3	77222E3
	2200	76 x 105	11.2	1.98	55	35	27222E3	67222E3	47222E3	87222E3
	3300	76 x 105	13.5	2.97	37	24	17332E3	57332E3	37332E3	77332E3
	3300	76 x 146	13.9	2.97	37	24	27332E3	67332E3	47332E3	87332E3
	4700	76 x 146	16.4	4.23	26	17	17472E3	57472E3	37472E3	77472E3
	5600	76 x 146	17.3	5.04	23	15	17562E3	57562E3	37562E3	77562E3
	6800	76 x 220	19.8	6.1	25	20	17682E3	57682E3	37682E3	77682E3
	6800	90 x 146	21.3	6.1	24	19	-	-	47682E3	87682E3
	10 000	90 x 220	26.5	9.0	17	14	-	-	47103E3	87103E3





Aluminum Capacitors  
Power High Ripple Current Screw Terminals

101/102 PHR-ST  
Vishay BCcomponents

ADDITIONAL ELECTRICAL DATA		
PARAMETER	CONDITIONS	VALUE
<b>Voltage</b>		
Surge voltage	≤ 250 V versions	$U_s = 1.15 \times U_R$
	≥ 350 V versions	$U_s = 1.1 \times U_R$
Reverse voltage		$U_{rev} \leq 1 \text{ V}$
<b>Current</b>		
Leakage current in $\mu\text{A}$	After 1 minute at $U_R$	$I_{L1} \leq 0.006 C_R \times U_R$
	After 5 minutes at $U_R$	$I_{L5} \leq 0.002 C_R \times U_R$
<b>Inductance</b>		
Equivalent series inductance (ESL)	Case Ø D = 35 mm	Typ. 13 nH
	Case Ø D = 50 mm	Typ. 16 nH
	Case Ø D = 65 mm	Typ. 19 nH <sup>(1)</sup>
	Case Ø D = 76 mm	Typ. 20 nH <sup>(1)</sup>
	Case Ø D = 90 mm	Typ. 21 nH <sup>(1)</sup>

**Note**

<sup>(1)</sup> Low ESL designs available on request

**RIPPLE CURRENT AND USEFUL LIFE**

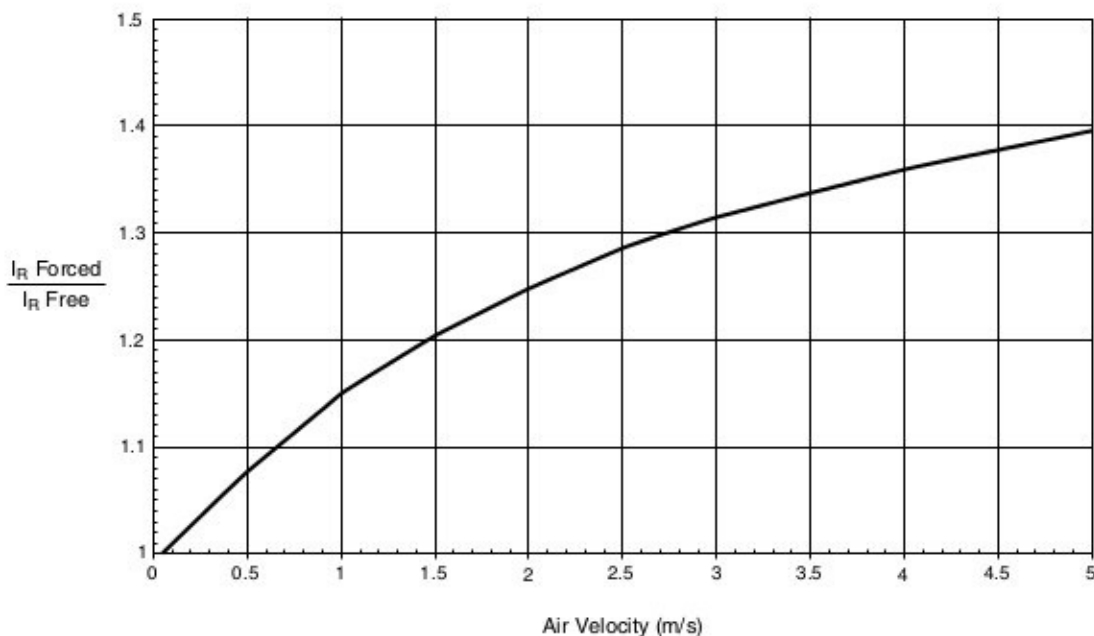
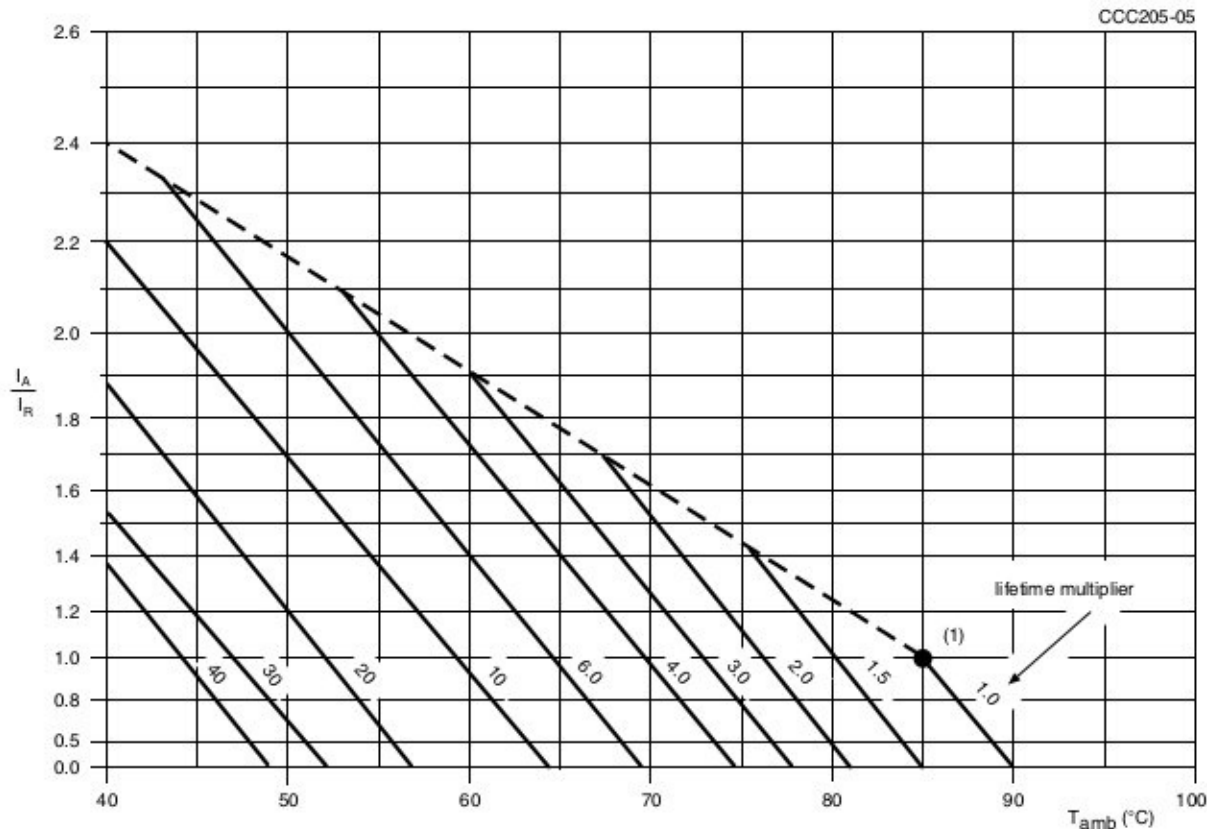


Fig.3 Multiplier of ripple current ( $I_R$ ) as a function of air flow

MAXIMUM RIPPLE CURRENT			
PARAMETER	CONDITION	MAXIMUM RIPPLE CURRENT MULTIPLIER	VALUE
Ambient temperature ( $T_{amb}$ )	70 °C	From nomogram; see fig. 4	1.6
Operating frequency (f)	400 Hz	From frequency; table 4	1.3
Air flow	2 m/s	From air-flow; see fig. 3	1.25

**Note**

• Calculation example for 102 series. Maximum ripple current multiplier =  $1.6 \times 1.3 \times 1.25 = 2.6$



$I_A$  = actual ripple current at 100 Hz

$I_R$  = rated ripple current at 100 Hz and 85 °C

(1) Useful life at 85 °C and  $I_R$  applied:

101 series: case  $\varnothing D \leq 50$ : 10 000 h

case  $\varnothing D \geq 65$ : 15 000 h

102 series: 10 000 h

Fig.4 Multiplier of useful life as a function of ambient temperature and ripple current load

Table 4

MULTIPLIER OF RIPPLE CURRENT ( $I_R$ ) AS A FUNCTION OF FREQUENCY		
FREQUENCY (Hz)	$I_R$ MULTIPLIER	
	101	102
50	0.85	0.90
100	1.00	1.00
200	1.10	1.20
400	1.15	1.30
1000	1.20	1.40
10 000	1.30	1.50



Aluminum Capacitors  
Power High Ripple Current Screw Terminals

101/102 PHR-ST  
Vishay BCcomponents

Table 5

TEST PROCEDURES AND REQUIREMENTS			
TEST		PROCEDURE (quick reference)	REQUIREMENTS
NAME OF TEST	REFERENCE		
Endurance	IEC 60384-4/ EN130300 subclause 4.13	$T_{amb} = 85^{\circ}\text{C}$ ; $U_R$ applied; 2000 hours	$U_R \leq 100\text{ V}$ ; $\Delta C/C: \pm 15\%$ $U_R > 100\text{ V}$ ; $\Delta C/C: \pm 10\%$ $\tan \delta \leq 1.3 \times \text{spec. limit}$ $Z \leq 2 \times \text{spec. limit}$ $IL5 \leq \text{spec. limit}$
Useful life	CECC 30301 subclause 1.8.1	$T_{amb} = 85^{\circ}\text{C}$ ; $U_R$ and $I_R$ applied;  101 series: Case Ø D ≤ 50: 10 000 hours Case Ø D ≥ 65: 15 000 hours  102 series: 10 000 hours	$U_R \leq 100\text{ V}$ ; $\Delta C/C: \pm 45\%$ $U_R > 100\text{ V}$ ; $\Delta C/C: \pm 30\%$ $\tan \delta \leq 3 \times \text{spec. limit}$ $Z \leq 3 \times \text{spec. limit}$ $I_{L5} \leq \text{spec. limit}$ No short or open circuit, No visible damage Total failure percentage: $U_R \leq 100\text{ V}: \leq 1\%$ ; $U_R > 100\text{ V}: \leq 3\%$
Shelf life (storage at high temperature)	IEC 60384-4/ EN130300 subclause 4.17	$T_{amb} = 85^{\circ}\text{C}$ ; no voltage applied; 500 hours  After test: $U_R$ to be applied for 30 minutes, 24 hours to 48 hours before measurement	$\Delta C/C: \pm 10\%$ $\tan \delta \leq 1.2 \times \text{spec. limit}$ $I_{L5} \leq 2 \times \text{spec. limit}$



### Disclaimer

All product specifications and data are subject to change without notice.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained herein or in any other disclosure relating to any product.

Vishay disclaims any and all liability arising out of the use or application of any product described herein or of any information provided herein to the maximum extent permitted by law. The product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein, which apply to these products.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay.

The products shown herein are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications unless otherwise expressly indicated. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so entirely at their own risk and agree to fully indemnify Vishay for any damages arising or resulting from such use or sale. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.



CUL 200

## Kupferlackdraht CUL auf Mini Spule

### Enamelled copper wire CUL on mini bobbins

- **Isolierlackbasis min. Polyurethan, mod.**  
Insulating varnish min. Polyurethan, mod.

- **Dauerwärmebeständigkeit 155 °C (Kl. F)**  
Heat resistant 155 °C (Cl. F)

- **Verzinnbarkeit >350 °C**  
Tin-plate >350 °C

Kupferlackdraht nach IEC 60317-20

Grad 1

TJ min. 155 °C

Lötbar

Enamelled copper wire to IEC 60317-20

Degree 1

TJ min. 155 °C

Solderable

Typ Type	CUL 50/0,08	CUL 50/0,10	CUL 50/0,15	CUL 50/0,22	CUL 100/0,10	CUL 100/0,15	CUL 100/0,22	CUL 100/0,28
Strombelastung current car. cap.	0.02 A	0.03 A	0.06 A	0.14 A	0.03 A	0.06 A	0.14 A	0.22 A
Dauerwärmebeständigkeit Heat resistance	155 °C (Cl. F)	155 °C (Cl. F)	155 °C (Cl. F)	155 °C (Cl. F)	155 °C (Cl. F)	155 °C (Cl. F)	155 °C (Cl. F)	155 °C (Cl. F)
Isolierlackbasis insulating varnish	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.
Verzinnbarkeit Tin-plate	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C
Drahtdurchmesser Wire diameter	0.08 mm	0.10 mm	0.15 mm	0.22 mm	0.10 mm	0.15 mm	0.22 mm	0.28 mm
Gewicht Weight	0.05 kg	0.05 kg	0.05 kg	0.05 kg	0.30 kg	0.10 kg	0.10 kg	0.30 kg



**Kupferlackdraht CUL auf Mini Spule**  
Enamelled copper wire CUL on mini bobbins

Typ Type	CUL 100/0,35	CUL 100/0,40	CUL 100/0,50	CUL 100/0,63	CUL 100/0,75	CUL 100/0,85	CUL 100/1,00	CUL 100/1,12
Strombelastung current car. cap.	0.35 A	0.45 A	0.70 A	1.00 A	1.55 A	2.00 A	2.80 A	3.50 A
Dauerwärmeständigkeit Heat resistance	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)
Isolierlackbasis insulating varnish	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.
Verarbeitbarkeit Tin-platable	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C
Drahtdurchmesser Wire diameter	0.35 mm	0.40 mm	0.50 mm	0.63 mm	0.75 mm	0.85 mm	1.00 mm	1.12 mm
Gewicht Weight	0.10 kg	0.30 kg	0.10 kg	0.10 kg	0.30 kg	0.10 kg	0.10 kg	0.30 kg



**Kupferlackdraht CUL auf Mini Spule**  
Enamelled copper wire CUL on mini bobbins

Typ Type	CUL 200/0,10	CUL 200/0,15	CUL 200/0,22	CUL 200/0,28	CUL 200/0,35	CUL 200/0,40	CUL 200/0,50	CUL 200/0,63
Strombelastung cur.mnt. car. cap.	0.03 A	0.06 A	0.14 A	0.22 A	0.35 A	0.45 A	1.70 A	1.00 A
Dauerwärmeständigkeit Heat resistance	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)
Isolierlackbasis insulating varnish	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.
Verarbeitbarkeit Tin-platable	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C
Drahtdurchmesser Wire diameter	0.10 mm	0.15 mm	0.22 mm	0.28 mm	0.35 mm	0.40 mm	0.50 mm	0.63 mm
Gewicht Weight	0.20 kg	0.20 kg	0.20 kg	0.20 kg	0.20 kg	0.20 kg	0.20 kg	0.20 kg



**Kupferlackdraht CUL auf Mini Spule**  
Enamelled copper wire CUL on mini bobbins

Typ Type	CUL 200/0,75	CUL 200/0,85	CUL 200/1,00	CUL 200/1,12	CUL 500/0,40	CUL 500/0,50	CUL 500/0,63	CUL 500/0,75
Strombelastung current car. cap.	1.55 A	2.00 A	2.80 A	3.50 A	0.45 A	0.70 A	1.00 A	1.55 A
Dauerwärmeständigkeit Heat resistance	155 °C (CLF)	255 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	255 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	255 °C (CLF)
Isolierlackbasis insulating varnish	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.
Verarbeitbarkeit Tin-platable	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C
Drahtdurchmesser Wire diameter	0.75 mm	0.85 mm	1.00 mm	1.12 mm	0.40 mm	0.50 mm	0.63 mm	0.75 mm
Gewicht Weight	0.20 kg	0.20 kg	0.20 kg	0.20 kg	0.50 kg	0.50 kg	0.50 kg	0.50 kg





**Kupferlackdraht CUL auf Mini Spule**  
Enamelled copper wire CUL on mini bobbins

Typ Type	CUL 500/0,85	CUL 500/1,00	CUL 500/1,12	CUL 500/1,32	CUL 500/1,50	CUL 500/1,80	CUL 500/2,00
Strombelastung current car. cap.	2.00 A	2.80 A	3.50 A	5.00 A	6.50 A	9.50 A	11.50 A
Dauerwärmeständigkeit Heat resistance	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)	155 °C (CLF)
Isolierlackbasis insulating varnish	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.	min. Polyurethan, mod.
Verarbeitbarkeit Tin-platable	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C	>350 °C
Drahtdurchmesser Wire diameter	0.85 mm	1.00 mm	1.12 mm	1.32 mm	1.50 mm	1.80 mm	2.00 mm
Gewicht Weight	0.50 kg	0.50 kg	0.50 kg	0.50 kg	0.50 kg	0.50 kg	0.50 kg

**Kupferlackdraht, lackisolierte Kupferlitze und  
Widerstandsdraht auf Mini Spule ab 01.11.2011**

Artikel	Gewicht [kg]	Mindestlänge [m]
CLI 200/120	0,2	16
CLI 200/15	0,2	128
CLI 200/30	0,2	69
CLI 200/60	0,2	32
CLI 200/90	0,2	22
CUL 100/0,10	0,1	1144
CUL 100/0,15	0,1	509
CUL 100/0,22	0,1	215
CUL 100/0,28	0,1	140
CUL 100/0,35	0,1	87
CUL 100/0,40	0,1	69
CUL 100/0,50	0,1	44
CUL 100/0,63	0,1	28
CUL 100/0,75	0,1	20
CUL 100/0,85	0,1	15
CUL 100/1,00	0,1	11
CUL 100/1,12	0,1	9
CUL 200/0,10	0,2	2289
CUL 200/0,15	0,2	1017
CUL 200/0,22	0,2	429
CUL 200/0,28	0,2	280
CUL 200/0,35	0,2	175
CUL 200/0,40	0,2	138
CUL 200/0,50	0,2	88
CUL 200/0,63	0,2	56
CUL 200/0,75	0,2	40
CUL 200/0,85	0,2	31
CUL 200/1,00	0,2	22
CUL 200/1,12	0,2	18
CUL 50/0,08	0,05	856
CUL 50/0,10	0,05	572
CUL 50/0,15	0,05	254
CUL 50/0,22	0,05	107
CUL 500/0,40	0,5	345
CUL 500/0,50	0,5	221
CUL 500/0,63	0,5	140
CUL 500/0,75	0,5	99
CUL 500/0,85	0,5	77
CUL 500/1,00	0,5	56
CUL 500/1,12	0,5	44
CUL 500/1,32	0,5	32
CUL 500/1,50	0,5	25
CUL 500/1,80	0,5	17
CUL 500/2,00	0,5	14

Artikel	Gewicht [kg]	Mindestlänge [m]
RD 100/0,1	0,1	1144
RD 100/0,2	0,1	286
RD 100/0,3	0,1	127
RD 100/0,4	0,1	71
RD 100/0,6	0,1	32
RD 100/0,8	0,1	18
RD 100/1,0	0,1	11
RD 100/1,2	0,1	8
RD 100/1,5	0,1	5
RD 100/2,0	0,1	3
RD 100/3,0	0,1	1
RD 100/4,0	0,1	0,7
RD 50/0,1	0,05	572
RD 50/0,2	0,05	143
RD 50/0,3	0,05	64
RD 50/0,4	0,05	36
RD 50/0,6	0,05	16
RD 50/0,8	0,05	9
RD 50/1,0	0,05	6
RD 50/1,2	0,05	4

## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich meine Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Arbeit noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Mittweida, 27. September 2013